

国际信息工程先进技术译丛

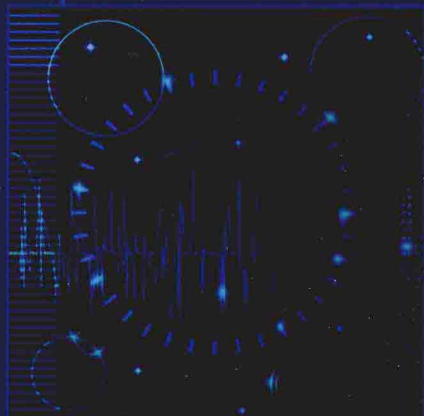
WILEY

LTE-Advanced：面向IMT-Advanced的3GPP解决方案

LTE-Advanced：3GPP Solution for IMT-Advanced

（芬） Harri Holma
Antti Toskala 编著

吕召彪 等译





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

LTE-Advanced：面向 IMT-Advanced 的 3GPP 解决方案

（芬） Harri Holma
Antti Toskala 编著
吕召彪 等译



机 械 工 业 出 版 社

本书对于 3GPP LTE-Advanced 系统 Release 10 及 Release 11 的标准化工作进行了说明，并对相关的关键技术进行了全面阐述，包括载波聚合技术、多输入多输出（MIMO）增强技术、中继技术、协同多点（CoMP）传输技术、异构网络（HetNet）技术和自组织网络（SON）增强技术。本书内容涵盖了 ITU 对于 IMT-Advanced 的标准化过程及 LTE-Advanced 的性能评估。书中采用大量的插图和仿真图，生动地对与 LTE-Advanced 相关的关键技术及其性能进行了说明，易于读者对于这些先进技术的理解。

本书是一本紧跟通信技术前沿研究的专著，主要适用于无线通信领域的研究人员和工程技术人员阅读，也可作为通信工程及相关专业的高年级本科生、研究生和教师的专业性新技术参考书。

图书在版编目（CIP）数据

LTE-Advanced：面向 IMT-Advanced 的 3GPP 解决方案/（芬）霍玛（Holma，H.），（芬）托斯卡拉（Toskala，A.）编著；吕召彪等译. —北京：机械工业出版社，2013.12

（国际信息工程先进技术译丛）

书名原文：LTE-Advanced：3GPP Solution for IMT-Advanced

ISBN 978-7-111-45058-0

Ⅰ. ①L… Ⅱ. ①霍… ②托… ③吕… Ⅲ. ①移动网－研究 Ⅳ. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 293743 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：张俊红 责任编辑：郑 彤

版式设计：霍永明 责任校对：申春香

封面设计：赵颖喆 责任印制：乔 宇

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 14 印张 · 276 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-45058-0

定价：68.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010)88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203	**封面无防伪标均为盗版**

译 者 序

移动互联网的高速发展使人们的通信方式发生了巨大的变化。智能终端的出现推动了用户行为的改变，移动用户越来越多地访问数据业务，数据业务逐步成为电信网络通信业务的重要组成部分。为了应对高速增长的数据业务需求，以及运营商之间的激烈竞争，无线蜂窝网络已经逐步开始向后3G网络时代演进。自2009年全球首个LTE（长期演进）商用网络开通，全球LTE商用网络的建设步伐逐步加快。特别是到了2012年，欧美主流运营商开始将其网络向LTE演进。国内各运营商也开始了LTE网络建设的各项准备工作。截至目前，全球已有175个LTE商用网络，且预计到2013年年底将会增加到248个。在LTE终端方面，目前全球已经有100家终端制造商发布了900余款LTE终端设备。这都预示着LTE将在全球范围内获得巨大的成功。

为了满足ITU（国际电信联盟）对4G网络（IMT-Advanced）的技术指标要求，3GPP（第3代合作伙伴计划）积极推动LTE的演进并在2011年完成了LTE-Advanced的第一个版本：3GPP Release 10。该版本能达到下行1Gbit/s和上行500Mbit/s的传输速率，远远超出了ITU对IMT-Advanced系统的要求。为提升LTE系统的传输速率和容量，3GPP在LTE-Advanced系统中引入了载波聚合技术、多输入多输出（MIMO）增强技术、中继技术、多点协作（CoMP）传输技术和异构网络（HetNet）技术。另外，3GPP也进一步优化了自组织网络（SON）功能，以提升LTE-Advanced系统的自动化管理能力和灵活性。随后，3GPP并未停止增强LTE-Advanced系统功能的脚步。在2013年3月完成了3GPP Release 11的标准化工作，并于2012年9月启动了Release 12版本的研究工作。

本书由诺基亚西门子网络（NSN）公司长期从事LTE关键技术研究及标准化工作的专家编著完成，对Release 10版本的LTE-Advanced系统关键技术及标准化进行了详细的阐述。在本书编著过程中，3GPP正在进行Release 11的标准化工作，因此本书仅对Release 11的主要技术内容进行说明。在本书的后续版本中将会对3GPP Release 11及Release 12的相关内容进行补充。本书在第1章中综述了全书的主要内容。在第2章对LTE-Advanced标准化的相关进程及未来的规划进行描述。在第3章中对LTE Release 8和Release 9关键技术及性能指标进行了简要介绍。第4章和第5章分别对上行链路和下行链路载波聚合技术进行讨论。第6章和第7章对上行链路和下行链路MIMO技术进行研究。第8章对异构网络的关键技术进行介绍。第9章介绍了中继技术，并对其性能进行了分析。第10章对自组织网络

(SON)的相关关键技术进行详细讨论。在第11章中对LTE-Advanced系统的无线性能进行仿真评估，并在第12章中对3GPP未来的标准化进行展望。在第13章中对CoMP传输技术进行了介绍。在第14章中对HSPA网络的最近演进版本进行了总结说明。

本书译本由中国联通网络技术研究院吕召彪博士主持翻译，并负责全书统稿和审核工作。长期从事3GPP LTE-Advanced标准化及关键技术研究工作的中国联通网络技术研究院同事范斌、裴郁杉、马彰超、崔斐、许郡、盛煜、杨军以及中国电子信息产业集团有限公司苏晓旭参与并完成了本书的翻译和校勘工作。本书在翻译过程中得到了中国联通网络技术研究院张猛、宋蒙、乌云霄等同事的大力支持；本书也获得了孙蒙、李成梅、金雨超、费翔、李剑波、张蒙、王昱心等同行的帮助。他们对于全书的翻译提出了很多建议和意见，并参与了部分翻译和校勘工作。

需要特别说明的是，本书是译者在尽量忠实于英文原书的基础上翻译的，书中观点并不代表译者及其所在单位的观点。最后，由于本书内容与概念的新颖性和译者不可避免存在的主观片面性，书中不妥和错误之处在所难免，敬请广大读者及同行专家批评指正。

译者

原 书 序

在近些年，无线网络中的数据流量呈现快速增长的趋势：网络已经从语音为主快速变化到了以数据为主。数据的使用量随着宽带无线网络覆盖和数据传输速率的增强而加速增长。LTE网络在2009年初开始部署，这使得网络数据传输速率达到100Mbit/s。在2012年LTE终端包括智能终端和平板电脑的普及使得对于LTE网络和数据传输的需求激增。LTE网络随后的演进称作LTE-Advanced，其将网络数据传输速率提升到1Gbit/s，并有效地提升了系统容量。本书主要对3GPP LTE-Advanced Release 10及Release 11的关键技术进行讨论，并对未来演进进行简要说明。相关关键技术的性能分析也在本书中涉及。

本书的结构如下。第1章综述了本书的内容。第2章对标准化的相关规划及进程进行了描述。第3章对LTE Release 8和Release 9进行了简要介绍。第4章和第5章分别对上行链路和下行链路载波聚合技术进行了讨论。第6章和第7章分别对上行链路和下行链路MIMO技术进行了分析。多层和多技术异构网络第8章介绍。第9章介绍了Relay技术及其优势。第10章对与SON相关的关键技术进行了详细讨论。第11章中对LTE-Advanced系统的无线性能进行了仿真评估。第12章给出了未来的标准化展望。第13章对于CoMP传输技术进行了说明。在第14章中对HSPA网络的最近演进版本进行了总结说明。

读者需求调查表

个人信息

姓　　名：		出生年月：		学　　历：	
联系电话：		手　　机：		E-mail：	
工作单位：				职　　务：	
通讯地址：				邮　　编：	

1. 您感兴趣的科技类图书有哪些？

□自动化技术　□电工技术　□电力技术　□电子技术　□仪器仪表　□建筑电气　□其他（　　）

以上各大类中您最关心的细分技术（如 PLC）是：（　　　　）

2. 您关注的图书类型有：

□技术手册　□产品手册　□基础入门　□产品应用　□产品设计　□维修维护　□技能培训

□技能技巧　□识图读图　□技术原理　□实操　　□应用软件　□其他（　　）

3. 您最喜欢的图书叙述形式

□问答型　□论述型　□实例型　□图文对照　□图表　□其他（　　）

4. 您最喜欢的图书开本为：

□口袋本　□32 开　□B5　□16 开　□图册　□其他（　　）

5. 您常用的图书信息获得渠道为：

□图书征订单　□图书目录　□书店查询　□书店广告　□网络书店　□专业网站

□专业杂志　□专业报纸　□专业会议　□朋友介绍　□其他（　　）

6. 您常用的购书途径为：

□书店　□网络　□出版社　□单位集中采购　□其他（　　）

7. 您认为图书的合理价位是（元/册）：

手册（　　）图册（　　）技术应用（　　）技能培训（　　）基础入门（　　）其他（　　）

8. 您每年购书费用为：

□100 元以下　□101～200 元　□201～300 元　□300 元以上

9. 您是否有本专业的写作计划？

□否　　　　□是（具体情况：　　　　　　）

非常感谢您对我们的支持，如果您还有什么问题欢迎和我们联系沟通！

地　　址：北京市西城区百万庄大街 22 号　机械工业出版社电工电子分社　邮编：100037

联系人：张俊红　联系电话：13520543780　传真：010-68326336

电子邮箱：buptzjh@163.com（可来信索取本表电子版）

编著图书推荐表

<table>
<tr><td>姓　　名</td><td></td><td>出生年月</td><td></td><td>职称/职务</td><td></td><td>专　　业</td><td></td></tr>
<tr><td>单　　位</td><td colspan="3"></td><td>E-mail</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>通讯地址</td><td colspan="5"></td><td>邮政编码</td><td></td></tr>
<tr><td>联系电话</td><td colspan="2"></td><td colspan="3">研究方向及教学科目</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="8">个人简历（毕业院校、专业、从事过的以及正在从事的项目、发表过的论文）</td></tr>
<tr><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td colspan="8">您近期的写作计划有：</td></tr>
<tr><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td colspan="8">您推荐的国外原版图书有：</td></tr>
<tr><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td colspan="8">您认为目前市场上最缺乏的图书及类型有：</td></tr>
<tr><td colspan="8"></td></tr>
</table>

地址：北京市西城区百万庄大街 22 号　机械工业出版社　电工电子分社

邮编：100037　网址：www. cmpbook. com

联系人：张俊红　电话：13520543780/010-88379768　010-68326336（传真）

E-mail：buptzjh@163. com（可来信索取本表电子版）

目　录

第1章　概　　述

Harri Holma，Antti Toskala

1.1　简介

智能手机和平板电脑的大量普及推动了移动宽带网络需求的增加，用户发现了移动设备与无线宽带连接相结合后更高的存在价值。用户和新的应用需要更快的访问速度和更短的延迟，而运营商则需要更大的容量和更高的效率。LTE（Long Term Evolution，长期演进）完全可以满足用户和运营商的要求。GSM（Global System for Mobil Commuication，全球移动通信系统）将语音无线化，HSPA（High Speed Packet Access，高速分组接入）实现了初步的数据连接无线化，LTE 为移动宽带应用提供了大量的功能。

2009 年 3 月，3GPP（Third Generation Partnership Project，第 3 代合作伙伴计划）完成了第一版 LTE 规范；2009 年 12 月，开创了首个 LTE 商用网络；2011 年年底，全球大约有 50 个 LTE 商用网络，到 2012 年年底有超过 100 个 LTE 商用网络。2011 年推出了第一款 LTE 智能手机，2012 年大量的 LTE 设备涌进市场。LTE 智能手机的一个示例如图 1.1 所示：诺基亚 Lumia 900。其具有 100Mbit/s 的 LTE 数据传输速率和先进的多媒体功能。总体而言，部署 LTE 网络已经成为成功案例。LTE 在数据传输速率和时延方面表现出的性能极具吸引力，并且人们对于该技术的接受也很快。底层技术能力的进一步发展，推动 LTE 技术走向更高的数据传输速率、更高的基站密度和更高的效率。本书描述了 LTE 的后续演进，称之为 LTE-Advanced，其主要用来增加数据传输速率使之超过 1Gbit/s。

1.2　LTE 无线技术融合

在移动通信的历史上已经有很多相互竞争的语音和数据的无线标准，LTE 改变了此局面，因为所有现存的无线技术都能与 LTE 相融合。LTE 不仅是 GSM/HSPA 运营商的演进方向，同样也是 CDMA（Code Division Multiple Access，码分多址）和 WiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access，全球微波互联接入）运营商的演进方向。因此，LTE 能够实现最大可能的生态系统。LTE 可与当前的无线网络共存融洽。大多数的 GSM/HSPA 运营商保持其现有的 GSM 和 HSPA 无线网络

与 LTE 共同运行一段较长的时间，也不断推动现有的 GSM 和 HSPA 演进网络。LTE 终端一般是具有支持 GSM 和 HSPA 能力的多模终端，无线网络解决方案也是基于能够同时运行所有三种无线制式的多模基站。为了简化网络管理并保持网络的不断演进，许多运营商在他们目前的网络中引入 LTE 部署，并采用多模基站产品。

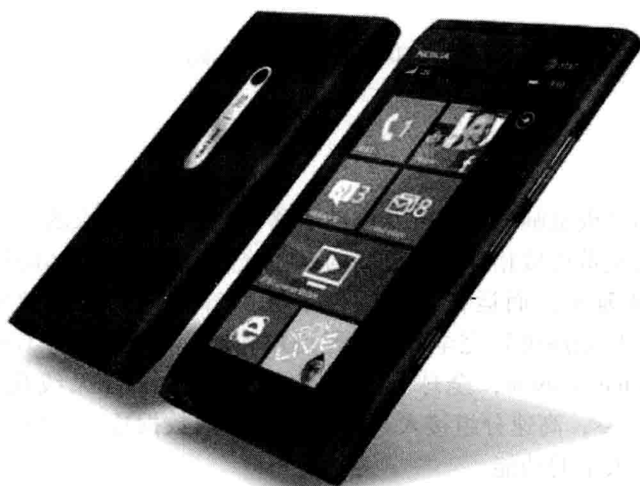


图 1.1 LTE 智能手机示例——诺基亚 Lumia 900

CDMA 和 WiMAX 运营商的出发点是不同的，因为这些无线技术后续没有明确的演进路线。因此，CDMA 和 WiMAX 运营商往往对 LTE 部署有着最积极的计划，目的是迅速地进入主流 3GPP 无线技术，享受 LTE 无线性能并且进入世界终端市场。

基本的无线技术演进示意如图 1.2 所示。

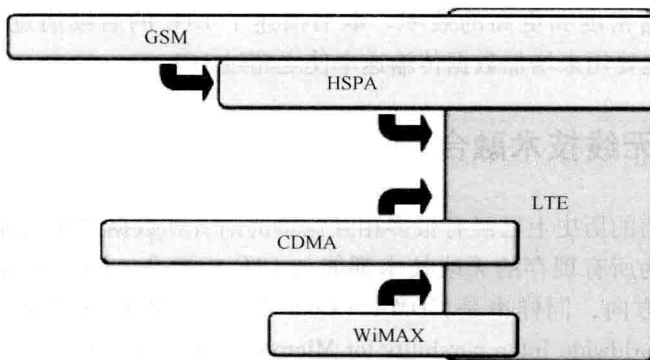


图 1.2 无线技术向 LTE 融合

1.3 LTE 性能

在 LTE Release 8 中，采用 20MHz 的带宽和 2×2 MIMO，下行链路峰值数据速率为 150Mbit/s。第一款 LTE 终端设备支持高达 100Mbit/s 的下行数据传输速率。在 20MHz 带宽的商用网络中，平均下行数据传输速率介于 20~40Mbit/s 间，上行数据传输速率 10~20Mbit/s，实例测试结果如图 1.3 所示。LTE 实际的数据传输速率在很多情况下高于 ADSL（Asymmetric Digital Subscriber Line，非对称数字用户环路）固定的可用数据传输速率。LTE 部署了多种不同的带宽：大多数网络使用 5~20MHz 的带宽。如果带宽小于 20MHz，则速率会相应地缩小。LTE 同时推出了 FDD（Frequency Division Duplex，频分双工）和 TDD（Time Division Duplex，时分双工）的双工选择。LTE 的优势在于 FDD 和 TDD 模式在标准上达到了高度的一致。

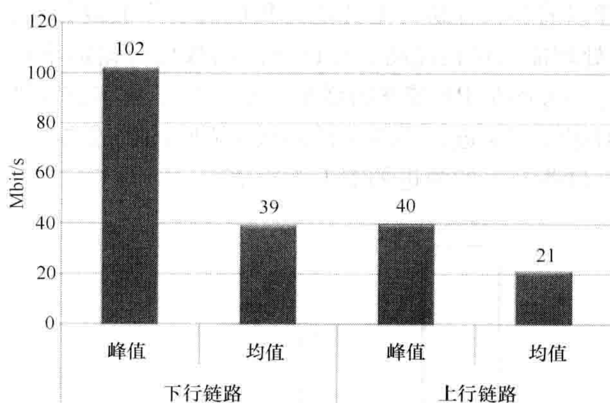


图 1.3 20MHz 带宽下的 LTE 网络实例测试数据速率

降低时延以提高用户体验：LTE 网络能够提供通信往返时间在 10~20ms，LTE 系统支持整个网络内的移动性，包括 LTE 带内的无缝切换和与传统无线网络间的异频切换。LTE 网络通过使用不连续的接收和发送（DRX / DTX）来优化终端功耗。

LTE 简单的网络部署需求也给运营商带来了优势。扁平化架构减少了网络层次和接口的数目。SON（Self-Organizing Networks，自组织网络）使得网络配置和优化更简单，保证了更快、更高效的网络部署。

LTE 支持多种不同的频带，以满足全球所有运营商的需求。大量的 RF 频带导致难以生产通用的 LTE 终端，实际的解决方案是对不同的市场推出不同的终端类别。在漫游的情况下，主要由传统的无线网络来处理。

最初的LTE智能手机有多种不同的语音解决方案：从LTE到传统无线（GSM、HSPA和CDMA）电路域回落（CSFB）切换或双模双待终端（CDMA + LTE）。这两种方法都使用传统的电路交换网络传输语音和LTE网络传输数据，LTE语音（Voice over LTE，VoLTE）的解决方案IP语音电话（Voice over IP，VoIP）也在2012年开始。

1.4　底层技术演进

无线技术的改进需要底层技术演进的支持。相关技术组件包括海量存储、基带、RF和充电电池，都在不断演进，并有助于实现新型的无线技术。在未来的10年里，海量存储的大小预计将以最快的速度增长，将允许设备存储更多的数据，并可以通过无线下载海量数据。内存大小可以从几兆字节增大到几太字节。数字化处理也有强大的演进，根据摩尔定律，数字处理能力在这几十年内一直不断提高。集成度的演进将不像以前那么容易，尤其是当我们需要降低设备功耗时。尽管如此，在2010年，数字处理能力仍在提高，允许更高的数据传输速率和更强大的干扰消除技术。演进的另一方面是RF带宽的增加，它是基于数字前端处理的创新。电池容量仍在经历相对缓慢的演进，终端功耗仍然是面临的挑战之一。因此仍然需要终端具有省电功能，这些技术的演进如图1.4所示。

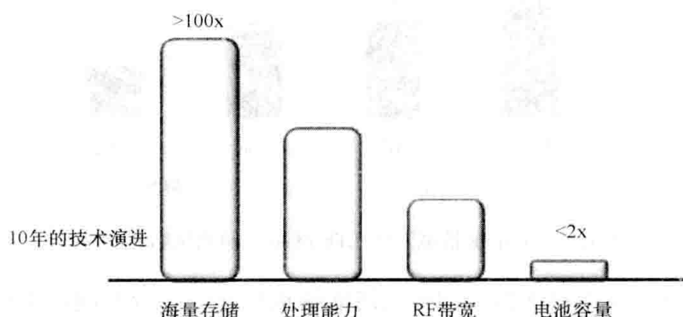


图1.4　底层技术的演进

LTE-Advanced的设备和基站将会受益于技术的演进，更高的数据传输速率和更宽的带宽要求基带和射频的技术演进。LTE-Advanced终端设备同样将受益于更大的存储容量和更高的电池容量。

1.5　流量增长

在过去的几年里，移动网络的数据量有大幅增长，并且预计增长将会持续。从

2007 年的流量增长到 2015 年的预计增长如图 1.5 所示。该图显示了全球移动网络的总数据量，单位为 EB，也就是，数以百万计的 TB。流量分为来自笔记本电脑、平板电脑和智能手机的语音和数据流量。2009 年在携载数据量方面，数据流量已经超过了语音流量。初步数据增长由无线数据上网驱动，如图 1.6 所示。预计 LTE-Advanced 的性能，例如高数据速率，也将首先被引进到无线数据上网卡。2012～2015 年相对增长最快的预计来自于智能手机，到 2015 年，智能手机使用几乎一半的流量。2015 年总数据流量将会超过 2007 年流量的 40 倍，语音流量的份额到 2015 年会缩减至不到 5%。一些先进市场的总流量已经超过了语音流量的 50 倍，这就意味着语音流量不到总流量的 2%。

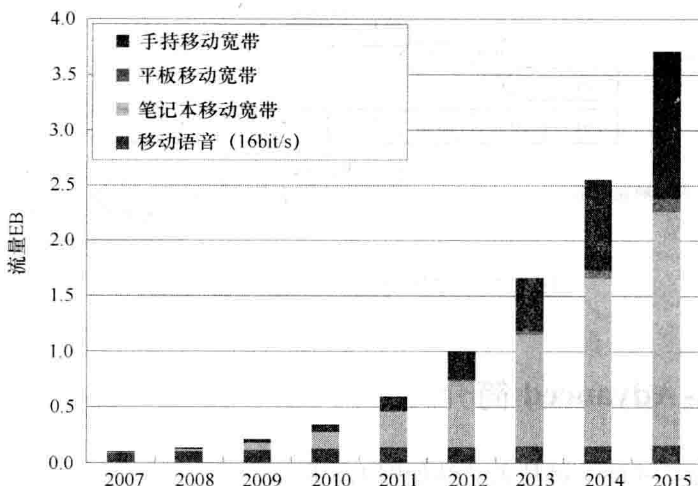


图 1.5　预计流量增长（诺基亚西门子通信公司 2011 年估计）



图 1.6　一个 100Mbit/s 的 USB 调制解调器示例——诺基亚西门子通信公司 7210

网络中数据量的增长、信号量的增长和连接设备数量的增长，都是无线演进工作需要解决的因素。

1.6 LTE-Advanced 的计划表

在 3GPP Release 10 中首次确定了 LTE-A 标准，此版本在 2011 年 6 月完成。Release 11 的目标完成日期是 2012 年 12 月，在 3GPP 中典型的版本周期为 1.5 年，除了一些较小的版本，如在一年内完成的 Release 9。从完成规范到使用第一个商业网络和设备将会花费 1.5 年，一些小的功能可以很快实施，而一些要求大量重新设计的主要功能可能需要较多的时间。预计第一个商用 LTE-A 技术实现在 2013 年，Release 11 的技术在 2014 年年底实现。3GPP LTE-Advanced 的时间表如图 1.7 所示。

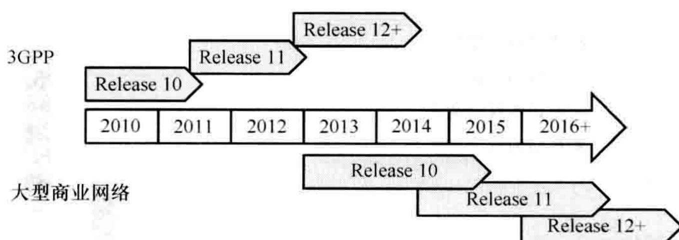


图 1.7 3GPP LTE-Advanced 的时间表

1.7 LTE-Advanced 简介

LTE-Advanced 的关键技术总结如图 1.8 所示。

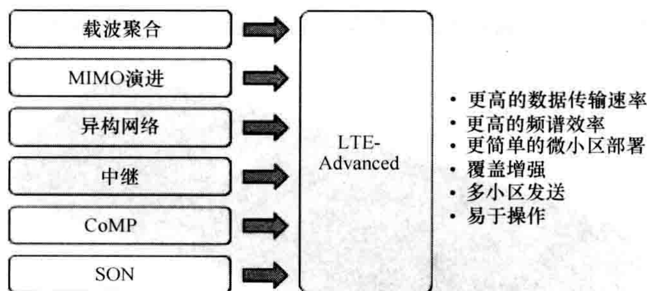


图 1.8 LTE-Advanced 的主要特点概述

1）下行链路载波聚合采用 20 + 20MHz 频谱和 2 × 2 MIMO（Multiple Input Multiple Output，多输入多输出）可使峰值数据速率达到 300Mbit/s。采用 100MHz 带宽和 8 × 8MIMO 使数据传输速率达到 3Gbit/s。增大带宽是提高数据速率的简易解决方案。

2）MIMO 演进至下行链路 8×8 和上行链路 4×4。在保持终端天线数量较少的情况下，基站可以使用 MIMO 的方式。其采用波束成形，可在增大网络容量的同时保证终端复杂度处于较低水平。多天线增大了数据速率和网络容量。

3）同频部署的宏小区和微小区组成了异构网络（Heterogeneous Networks，HetNet）。异构网络的特点保证了小区间的干扰协调。在高密度的微小区和宏小区共用频率时，这些特点增加了网络容量和覆盖范围。

4）中继节点通过 LTE 无线接口回程传输到基站。传输链路可以使用带内或带外资源，如果没有可用的有线回程连接，中继可增加网络覆盖范围。MIMO 传输和接收允许多个小区对一个终端进行数据连接。MIMO 提高了受小区间干扰限制的小区边缘用户的数据速率。

5）SON 通过提供正确的配置和优化参数设置，使网络部署更快、更简单，并最终改善用户性能。

Release 10 的 LTE-Advanced 技术可以在 Release 8 网络同频的基础上灵活升级，这样可以继续支持 Release 8 的终端。因此，从 LTE 到 LTE-Advanced 的演进将是平稳的。所有这些功能将在本书中进行详细介绍。

1.8 小结

在实际性能、商用网络和终端推动方面，LTE Release 8 是一个成功的技术。与此同时，智能手机的高速普及推动移动宽带演进需求的增加。LTE-Advanced 的目的是加强数据速率、容量、覆盖范围和操作简单方面。在 2011 年的 3GPP 上，完成了第一个 LTE-Advanced 规范，在 2013 年这些技术可以商业化使用。LTE-Advanced 向后与 LTE 兼容，并且可以在同频时与 LTE Release 8 的终端共存。

第 2 章　LTE- Advanced 的标准化

Antti Toskala

2.1　简介

本章主要介绍 LTE- Advanced 的标准化方向。LTE- Advanced 的标准化进程由 3GPP 控制。3GPP 也制作了 LTE 的早期版本，Release 8 和 Release 9，以及 WCDMA 和 HSPA 的版本（也制作了随后的 GSM 演进版本）。WCDMA/HSPA、CDMA 和 WiMAX 技术阵营的所有主流运营商都已接受了 LTE 和 LTE- Advanced 技术路线作为未来技术这个选择。3GPP 由所有主流的设备供应商、设备制造商组成，其中包括全部的基础设施、终端、芯片及无线测试设备的全球竞争者。3GPP 目前有 384 个成员组织构成，大约有 4000 位会议代表每个月都会有许多天的时间投入到技术发展的研究中，每一年批准 9000 多个对规范的修改申请。每一年都有成千上万的输入文档由不同的公司提交给不同的 3GPP 工作组。3GPP 的组织结构和工作流程在参考文献［1］中有更详细的描述。这一章首先介绍了 3GPP 中 LTE- Advnanced 相关的版本时间表，然后展示了 3GPP 在 LTE- Advanced 进入实质性规范化之前的研究概况。本章首先回顾了由 3GPP 提出的 LTE- Advanced 的需求集以及向 ITU- R IMT- Advanced 的提交过程，然后介绍了后续 LTE 版本的一些可预见的步骤。本章将对 3GPP 中 LTE- Advanced 相关标准进行总结介绍。

2.2　LTE- Advanced 与 IMT- Advanced

国际电信联盟无线电通信部门（ITU- R）在 2008 年启动了新系统 IMT- Advanced 的研究进程，并且在参考文献［1］中，IMT- 2000 的前期进程后于当年的通知函中开启了征收无线技术提案的进程。ITU- R 征集无线技术方面的提案要求必须能够实现一个多功能的无线电技术的需求，从而进一步成为 IMT- Advanced 系统中的合格技术。通常把 IMT- Advanced 也称为第四代移动通信系统（4G）。3GPP 响应了通知函的号召，提交了 Release 10 LTE- Advanced 以及 LTE- Advanced 可达性能的评估结果。2010 年年底，整个过程以完整规范的提交完美收官，随后的 2011 年又进行了一些更新。在图 2.1 中展示了 ITU- R、IMT- Advanced 和 3GPP LTE- Advanced 发展进程的时间表。

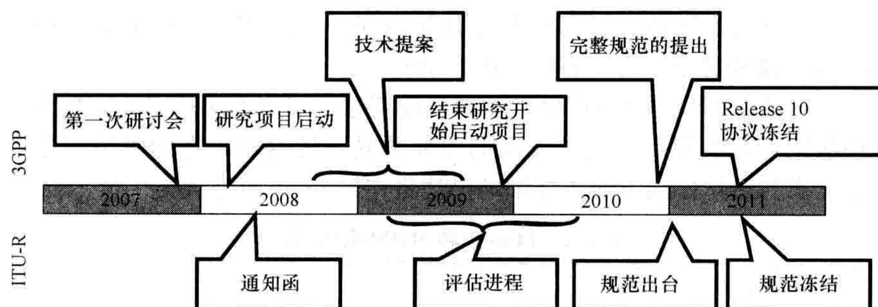


图 2.1　LTE-Advanced 标准化和 IMT-Advanced 进程时间表

2.3　LTE-Advanced 需求

ITU-R 定义了 IMT-Advanced 的需求，以使系统可以达到以下功能：

① 在高速移动的场景下峰值速率达到 100Mbit/s，在低速移动的场景下峰值速率达到 1Gbit/s；

② 允许其他无线接入系统互联；

③ 能够实现高质量移动服务；

④ 实现全球漫游功能；

⑤ 具有支持大量经济型较强的服务和应用的灵活性。

另外在以下范围内定义了需求：

① 蜂窝小区频谱利用率，从室内下行场景的 3bit/Hz/小区到高速运动的上行场景的 0.7bit/Hz/小区；

② 峰值频谱效率最高达到 15bit/s/Hz；

③ 带宽支持具有灵活性，最高支持 40MHz，并且进一步可扩展到 100MHz；

④ 小区边缘用户频谱效率变化范围为 0.015 ~0.1bits/s/Hz；

⑤ 控制平面在 100ms 内实现空闲和激活状态转换的延迟需求，以及相应的 10ms 用户平面的延迟需求（在非负载情况下）；

⑥ 移动性支持最高 350km/h 的移动速度（数据速率小于静止场景）；

⑦ 同频切换中断时间为 27.5ms，在带宽内频率间切换中断时间为 40ms，带宽外频率间切换中断时间为 60ms；

⑧ VoIP 业务容量达到每扇区 30 ~50 用户/MHz。

3GPP 也定义了自身对 LTE-Advanced 的需求，这个需求在很多场景下相比于 IMT-Advanced 的需求更加严格。这是由于 Release 8 的 LTE 已经形成一个高级的版本，所以这个版本已经可以满足 IMT-Advanced 在许多方面的需求（特别是高速移

动的场景）。因此，3GPP 需要确认从 Release 8/9 的 LTE 到 Release 10 的 LTE-Advanced 在性能和容量上有足够的可提升空间。

表 2.1 总结了 ITU-R 和 3GPP 的主要性能需求，可以看出两者在峰值频谱效率和小区边缘用户频谱利用率需求方面的主要差异。延迟需求在两种情况下是相同的。关于需求和可达性能方面更详细的描述将在第 11 章中进行。

表 2.1　ITU-R 和 3GPP 需求对比

系统性能需求	3GPP 需求	ITU-R 需求
下行峰值频谱效率	30bit/s/Hz（最多 8 天线）	15bit/s/Hz（最多 4 天线）
上行峰值频谱效率	15bit/s/Hz（最多 4 发天线）	6.75bit/s/Hz（最多 2 发天线）
上行小区边缘用户频谱利用率	0.04 ~ 0.07bit/s/Hz	0.03bit/s/Hz
下行小区边缘用户频谱利用率	0.07 ~ 0.12bit/s/Hz	0.06bit/s/Hz
用户平面时延	10ms	10ms

2.4　LTE-Advanced 的研究和规范化阶段

3GPP 研究工作的第一部分就是研究阶段，这一阶段在 2008 年年初启动，已完成了参考文献［1］中对物理层的介绍和参考文献［6］中的总体结论。以下 5 个方面的研究作为研究阶段的各个部分：

① 数据业务和 VoIP 业务的可达容量和小区边缘性能；

② 用户平面和控制平面的延迟；

③ 切换性能；

④ 可达峰值频谱效率（和峰值数据速率）；

⑤ 从无线射频角度考虑的支撑技术。

从 3GPP 得到的结果显示，目前在考虑中的技术组成可以满足甚至超过需求目标，在第 11 章中给出了相应的研究阶段报告。

在研究阶段之后是工作阶段（即产生实质性规范），工作阶段在 2010 年年底启动，并且产出了第一批完全规范集。这也是 3GPP Release10 规范的一部分，并且在 2011 年 6 月最终确定。

2.5　3GPP LTE-Advanced 未来增强版本

在第一个版本的 LTE-A 出现之后，3GPP 继续全速前进。Release11 紧随 Release10 之后开始了工作阶段，大量的提案涌现以进一步地提升 LTE-Advanced 的

性能。为了维护已有的计划，3GPP 不得不在 2011 年 9 月采取特定的措施来优先处理 Release11 的部分内容。这些筛选出的内容作为 2012 年下半年的最终定稿使用，同时规范的最终冻结在 2012 年末完成，如图 2.2 所示。

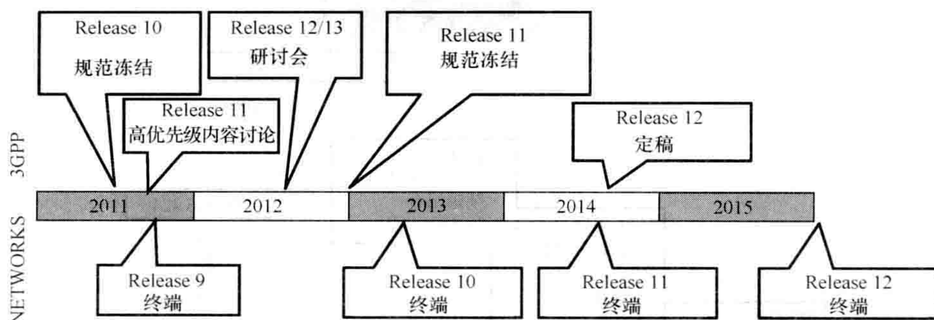


图 2.2 LTE-Advanced 未来版本规划和期望市场部署

3GPP 也正在准备 Release12 的内容，以及超出 LTE-Advanced 范围的内容。3GPP 在 2012 年 6 月举办的关于 Release12/13 的研讨会上，向运营商和设备商征集了有关未来版本的设想。虽然典型的版本释放周期为 18 个月，但是官方的 Release12 的时间点并没有确定。Release12 可能会在 2014 年下半年最终定稿。相关版本协议规范冻结 18 个月之后，第一批设备可以完成。基于上述假设，图 2.2 预测了 Release 10、Release11 和 Release12 终端设备进入市场的里程碑（ASN.1 协议语言开始后向兼容性，详细的解释见参考文献［1］）。

2.6 LTE-Advanced 规范

根据 3GPP 版本进展原则，LTE-Advanced 标准在原有 Release 8 和 Release 9 基础上添加进了 Release 10 相关技术内容。其中中继回路操作的物理层实现，如图 2.3 所示；载波聚合及多天线增强对物理层的影响等都在现存的 36.2xx 系列规范中给出。载波聚合频合是独立的版本，其中每个频带组合都被视为单独的项目来处理，参考文献［8］中给出了一个例子。如果对 Release 11 的细节功能没有进一步的需求，载波聚合频带组合可以在 Release 10 的基础上实施。如果在调度场景中需要一些 Release 11 的功能，例如多上行提前时间调整等，则频带组合应该给予 Release 11 的 LTE-Advanced 规范来实现。同样的规范下，可以通过一种独立版本的方式把一个新的频带加入到 3GPP 规范当中，这样不需要等到研究中的版本完成且终端可用时，新的频带就可以在 Release 11 或 Release 12 时间表内定稿。但是，这需要满足频段具体的射频和性能需求，基于 Release 8 的

终端仍然可以应用于新的频带（若 LTE-Advanced 特性有需求时，可以基于 Release 10）。

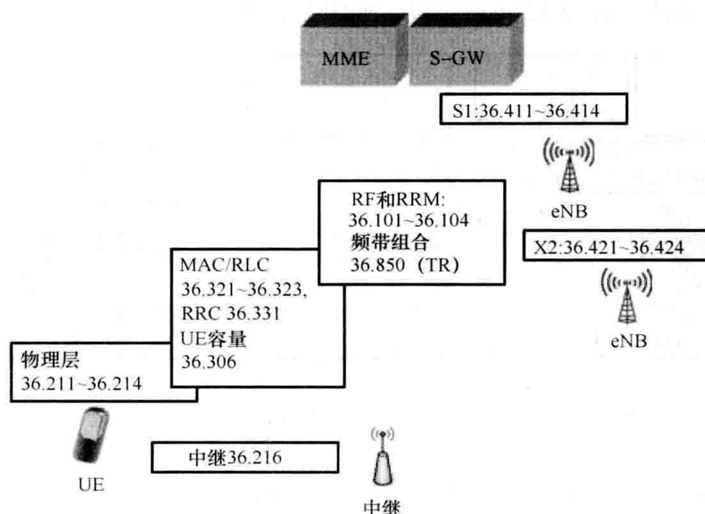


图 2.3 3GPP 中 LTE-Advanced 规范

2.7 小结

在前面的内容中，我们介绍了 LTE-Advanced 的标准化趋势。3GPP 已经在推动移动无线技术方面成为名副其实的先锋，并且在全球范围内广泛参与其中。3GPP 为推动 LTE-Advanced 的发展继续努力，包括正在进行的 Release11 的研究以及处在准备阶段的 Release 12 和 Release 13 的计划等，这些都在参考文献［9］中有所总结。连续不断的演进工作保证了 LTE-Advanced 始终是全球范围内运营商的首选解决方案，全球主流市场的运营商具有多样的技术背景，但都参与进了 LTE 的标准化工作，更好地证明了这一点。

参考文献

1. Holma, H. and Toskala, A. (2010) *WCDMA for UMTS*, 5th edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
2. ITU-R Home Page. Available at: http://www.itu.int/ITU-R (accessed May 2, 2012).
3. ITU-R report, M.2134 (November 2008), Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s).
4. 3GPP technical report TR 36.913 (March 2009) Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced), V8.0.1.
5. 3GPP technical report TR 36.814 (March 2010), Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced).

6. 3GPP technical report TR 36.912 (March 2010) Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced), v 9.2.0.
7. 3GPP technical specification TS 36.216 (September 2010) Physical layer for relaying operation, V10.0,0.
8. 3GPP Tdoc RP-100668 (June 2010) Work Item Description: LTE-Advanced Carrier Aggregation of Band 3 and Band 7, TeliasSonera.
9. 3GPP Tdoc RWS-120045 (June 2012) Summary of TSG-RAN workshop on Release 12 and onward, TSG-RAN Chairman.

第 3 章　LTE Release 8 与 Release 9 概述

Antti Toskala

3.1　简介

本章对 LTE Release 8、Release 9 进行概述，并将阐述其原理。Release 8、Release 9 是 3GPP 在 R10 中引入 LTE-Advanced 之前的两个版本。LTE-Advanced Release 10 的很多领域中的设计均基于 Release 8、Release 9 的原理，并进行微小的修改与增强以提升性能。特别是在很多情况下，LTE-Advanced 的架构与协议解决方案事实上并没有改变，或许只是增加了必要的元素以激活 LTE-Advanced 引入的物理层特性。本章将首先介绍 LTE Release 8、Release 9 的物理层原理，其次介绍其架构与协议解决方案，然后概述其分组核心演进（Evolved Packet Core，EPC）和 IP 多媒体子系统（IP Multimedia Subsystem，IMS），最后介绍 UE（User Equipment，用户设备）能力及 Release 8 与 Release 9 的区别。

3.2　物理层

LTE 的下行多址接入基于正交频分多址（Orthogonal Frequency Division Multiple Access，OFDMA），而上行基于单载波频分多址（Single Carrier Frequency Division Multiple Access，SC-FDMA）。

OFDMA 基于 15kHz 的子载波间隔，以保证在移动速率高和频率错误时有足够的鲁棒性，同时相应的采样速率兼容 WCDMA 的采样速率以便在 UE 和网络侧都能够更加容易地实现多模操作。OFDMA 发射机和接收机示意框图如图 3.1 所示。

上行链路方向上，由于没有并行的波形传输，SC-FDMA 有利于实现终端发送的节能。但是传输原理是在数字 QAM 调制加上符号块后使用循环前缀。SC-CDMA 的峰均比（Peak to Average Ratio，PAR），或者更确切地说，立方度量（Cubic Metric，CM）比 OFDMA 中的更低，因此可以避免使用高效的功率放大器而没有过多的功率回退，以最大化上行范围，具体细节见参考文献［1］。

由于符号在时域上持续时间短，在每个 QAM 符号后增加循环前缀并不可行，这将造成大量的开销。目前循环前缀在符号块上添加，其时域大小等于下行上的一个 OFDMA 符号。因此上下行中循环前缀的开销相同。LTE 上行 SC-FDMA 的收发

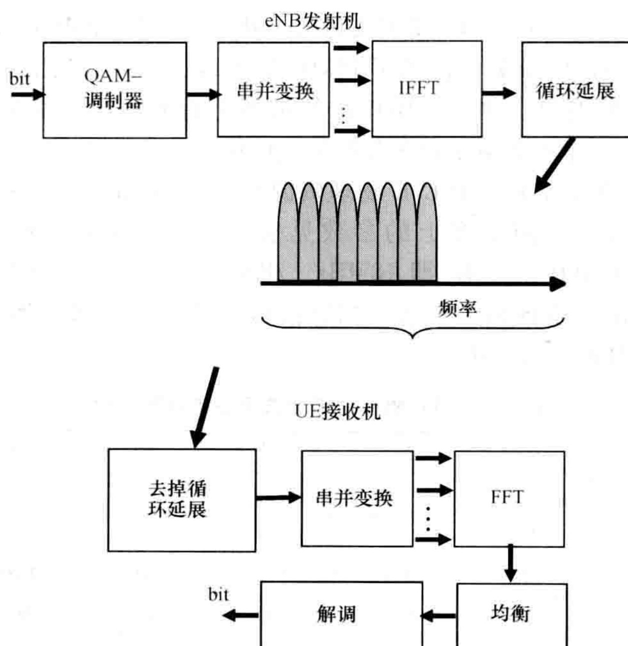


图 3.1 LTE 下行 OFDMA 原理

机示意图如图 3.2 所示。发射机采用 FFT 和 IFFT，通过简单有效地将发射信号映射到指示的上行链路带宽的一部分上实现频分。

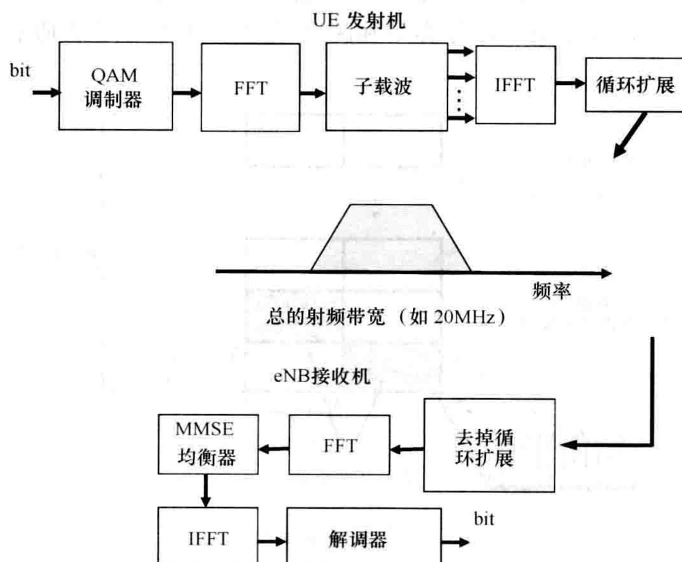


图 3.2 LTE 上行 SC-FDMA 原理

Release 8、Release 9 中 LTE 带宽支持 1.4MHz、3MHz、5MHz、10MHz、15MHz 和 20MHz。下行方向的带宽上占满了 15kHz 的子载波，并且预留了足够的空间以减小相邻载波上的波形。例如，10MHz 的带宽上有 600 个子载波，在频带共有 9MHz 的信号。上、下行频域上资源分配的实际解决方案为 180kHz。频域 180kHz、时域 1ms 子帧上的资源为一个 LTE 物理资源块（Physical Resource Block，PRB），等于 12 个子载波。不同带宽上的参数见表 3.1。最小的带宽为 6 个 PRB 即 1.08MHz，最大为 100 个 PRB 即 18MHz。相应的，通常部署时的带宽分别为 1.4MHz 和 20MHz 以达到相关要求，如邻信道干扰要求，邻道泄漏比（Adjacent Channel Leakage Ratio，ACLR）。

表 3.1　LTE 物理层带宽选项及其具体参数

带宽/MHz	1.4	3.0	5	10	15	20
子帧持续时间/ms	1					
子载波间隔	15					
FFT 长度	128	256	512	1024	1536	2048
子载波	72	180	300	600	900	1200
每时隙符号	7（短 CP）/6（长 CP）					
循环前缀	5.21μs（短 CP）/16.67μs（长 CP）					

下行采用 180kHz 物理资源块进行多址接入的原理如图 3.3 所示。eNB（eNodeB，LTE 增强型基站）每毫秒为需要传输下行数据的 UE 调度资源。eNB 调度器基于缓存中的数据量、UE 优先级、业务类型和瞬间信道条件等不同准则来确定每个 UE 传输数据的时间。

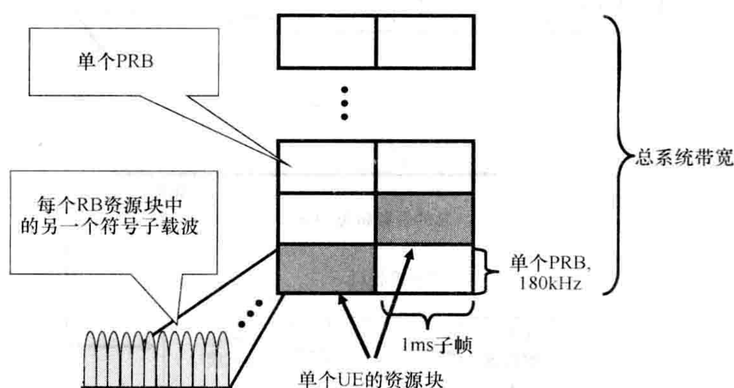


图 3.3　下行多址接入原理

与上行操作类似，UE 将在物理下行控制信道（Physical Downlink Control CHannel，

PDCCH）中发送资源分配信息，告知 UE 什么时候可以传输数据。UE 接收到的分配信息包含了 UE 可以传输数据的频域位置。上行链路中的分配始终为连续的 n 个 180kHz，而下行链路方向上的分配可以有 1 个或 2 个间隙（其中，后者只用于较大带宽中）。上行操作如图 3.4 所示，UE 每毫秒接收分配信息，指示它们在接下来的上行子帧中是否可以（及在频域的哪个位置）传输。

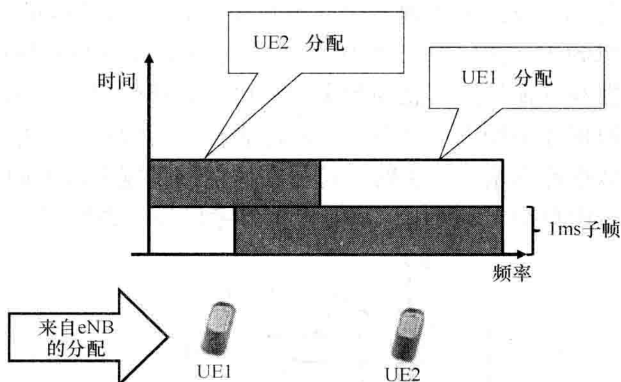


图 3.4　上行多址接入原理

帧结构基于 10ms 帧，包含 1ms 的子帧（子帧等于资源分配周期）。如图 3.5 所示，子帧分为控制和数据两部分。控制部分为 1 ~3 个符号，对应 PDCCH 信道。在最小带宽 1.4MHz 中，调度范围为 2 ~4 个符号以确保边缘用户在 PDCCH 链路自适应下的传输能力。剩余的子帧填充数据，对应物理下行共享信道（Phyiscal Downlink Shared Channel，PDSCH）信道。PDCCH 的分配间隔由物理控制格式指示信道（Physical Control Format Indicator Channel，PCFICH）在每个子帧上动态指示，即 PCFICH 指示 PDCCH 容量需要 1 个、2 个或 3 个 OFDMA 符号。

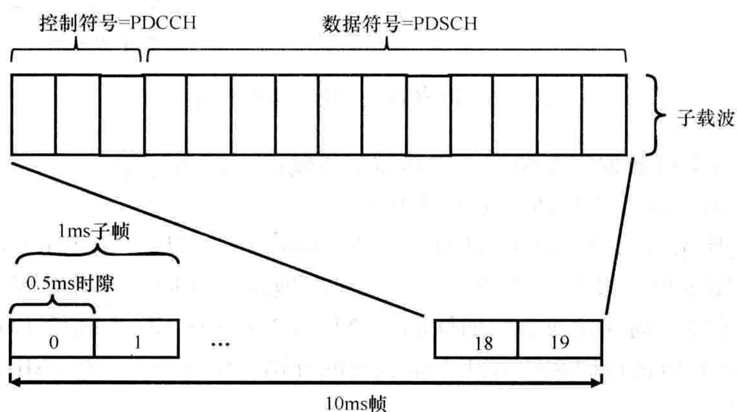


图 3.5　LTE FDD 下行帧结构

除了上述提到的下行物理信道，物理 HARQ 指示信道（Physical HARQ Indicator CHannel，PHICH）指示 UE 上行链路中的某个数据包是否被正确接收。此外，物理广播信道（Physical Broadcast CHannel，PBCH）携带系统信息或主信息块（Master Information Block，MIB）以指示实际的系统信息块（System Information Block，SIB）何时在 PDSCH 上传输。

上行链路方向上，数据由物理上行共享信道（Physical Uplink Shared CHannel，PUSCH）承载，PUSCH 结构如图 3.6 所示。分配的上行资源表格中的中间一列为参考信号，而数据和其他控制信息为剩余的表格。循环前缀在每列后增加，并且按列依次传输。当数据速率增大一倍时，每时隙表格的行数增加一倍，同时中间一列为参考信号。当数据速率增大一倍时，符号在两倍的带宽上按照两倍的速率依次传输。不管带宽是否由单个 UE 使用，都能保持参考信号开销恒定。

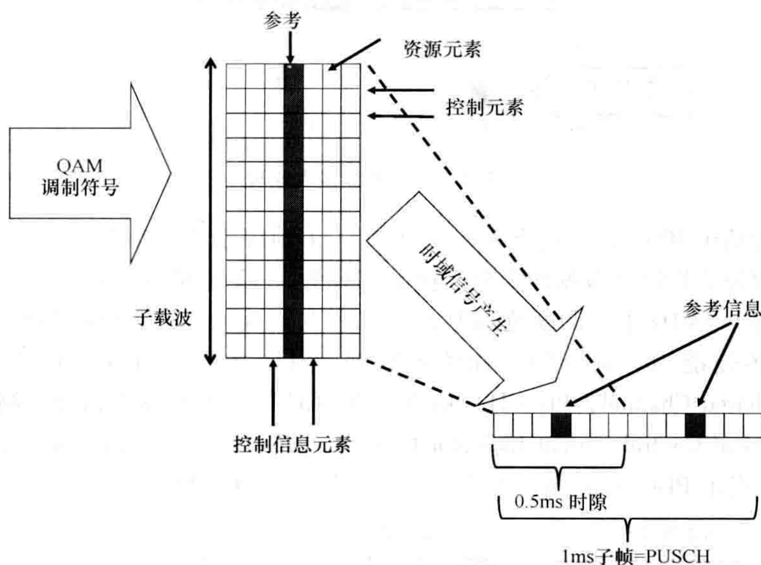


图 3.6　PUSCH 上的上行数据传输

即使没有上行数据需要调度，仍然需要传输以下控制信息：

① 下行数据包接收反馈（ACK/NACK）。

② 信道质量指示符（Channel Quality Information，CQI），指示 UE 可以接收的数据速率（宽带值）及在哪块频带上可以最好地接收数据。后者有利于下行频域调度。CQI 可以为周期性或非周期性的。eNB 可以在 PDCCH 上传输 CQI 请求以避免大量 UE 频繁地进行周期性 CQI 上报造成的开销，而这些 UE 在 eNB 的缓存中没有数据要发送。

③ 调度请求，以告知 eNB UE 有上行传输需要。此外，在 MAC 层上有更多详

细的上报可能，如缓存状态及上行功率资源等。

当没有 PUSCH 调度时，信号需要与独立的物理上行控制信道（Physical Uplink Control CHannel，PUCCH）一起处理。由于 PUCCH 每两个 0.5ms 在频谱的两端发送，因此在频带的边缘为 PUCCH 预留带宽。为避免不必要的资源预留，同时使用 CDM 以区分使用相同 PUCCH 资源空间（时域与频域）的 UE。图 3.7 所示为 PUCCH 资源分配示意图。

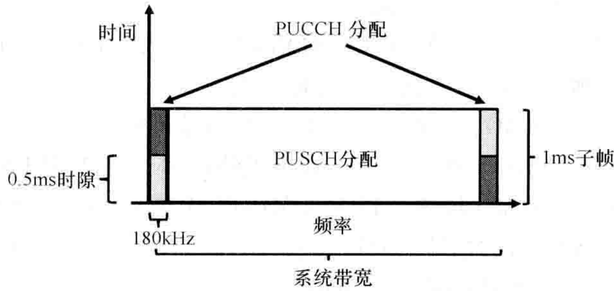


图 3.7　PUCCH 资源分配

上行方向上还有物理随机接入信道（Physical Random Access CHannel，PRACH），但该信道仅有一个前导，并且所有实际高层信息都在（eNB 前导接收确认和 PUSCH 资源分配之后）PUSCH 上传输。

LTE TDD 处理模式（常被记做 TD-LTE）中，当上、下行传输切换时有一个特殊子帧，如图 3.8 所示。TDD 与 FDD 系统中的物理层参数，包括带宽等都是相同的，由于 3GPP 希望 FDD 和 TDD 之间的差别最小化，并仅在通用解决方案不能使用（或可能严重影响系统性能）时才使用各自具体的解决方案。特殊子帧将每 5ms 或 10ms 出现一次。而选定的上、下行的配置将影响上行和下行的数据速率。如果给下行分配得多，那么下行峰值数据速率较大，而上行峰值速率和容量分别降低。特殊子帧后面的子帧可以配置为上行或下行，但是特殊子帧后面的第一个子帧总配

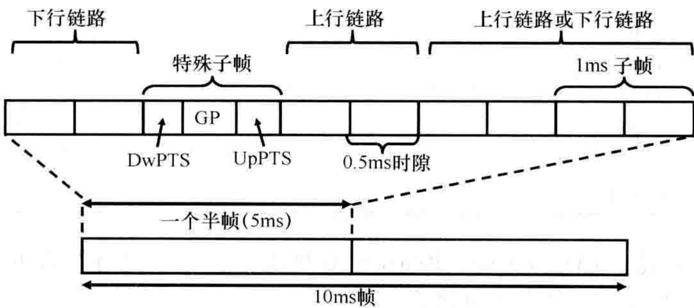


图 3.8　LTE TDD 具有特殊子帧的帧结构

置为上行。这是为了保证最小上行容量及RACH传输。

通常FDD和TDD模式非常一致，均为下行使用OFDMA，上行使用SC-FDMA。区别主要是改变传输方向时的需要，主要区别如下，具体见参考文献［1］：

① 当改变传输方向时，TDD包含特殊子帧。

② 同步信号的位置稍有不同。

③ ACK/NACK传输使用ACK/NACK绑定，是因为当UE解码下行数据并反馈时，它需要等待一个可用的上行时隙。

④ UE分类相同，但TDD模式中的峰值数据速率相对低并且取决于上、下行配置，因为部分子帧需要配置为另一个传输方向。

Release 8已引入MIMO，并在下行方向上有多种可能的传输方式（Transmission Modes，TM），表3.2给出了概述。TM1为单天线传输，TM2用于发射分集。TM3、TM4和TM6为单用户MIMO传输，TM5为多用户MIMO。MU-MIMO中，每个天线向不同的UE传输不同的数据流。TM7支持UE特定参考信号（UE Specific Reference Symbols，URS）的波束赋形。Release 9中增加了TM8，结合了URS的操作与波束赋形天线使得进行MIMO（多流）传输成为可能性。目前TM7（或TM8）对URS的支持仅限于在TDD模式中，而第一阶段的LTE FDD网络采用一般MIMO处理，如TM3。MIMO目前限定2个和4个下行发送天线，但目前UE侧可用天线数为2，有关UE的类别讨论见3.7节。

表3.2　下行链路单天线和MIMO处理的传输模式

LTE Release 9的传输模式		
传输模式	描　述	备　注
TM1	单天线传输	单天线端口：端口0
TM2	发射分集	2或4天线
TM3	具有循环延迟分集（Cyclic Delay Diversity，CDD）的开环空间复用	2或4天线
TM4	闭环空间复用	2或4天线
TM5	多用户MIMO	2或4天线
TM6	单流闭环空间复用	单流（秩1），2或4天线
TM7	波束赋形	单天线端口，端口5（虚拟天线端口，实际天线配置取决于部署）
TM8	双流波束赋型	双流传输，天线端口7和/或8

如第6章讨论，LTE-advance Release 10增加了TM9，允许在Release 10中采用新的参考符号结构进行多流波束赋形。

在上行方向上，只为UE定义了单天线传输。但是网络可以通过为UE提供不

同的参考信号序列配置两个或更多 UE 使用相同的上行 PRB。UE 不能感知是否有其他 UE 同时传输。这种 MIMO 操作增加的不是 UE 自身的峰值数据速率，而是小区中能达到的总峰值数据速率。这种虚拟 MIMO（或 MU-MIMO）的挑战是找出具有相似传输需求的 UE，且适合在相同频谱上进行频域调度并能同时为 UE 使用的信道提供足够的分离度。

3.3　架构

与 Release 6 HSPA 架构相比，LTE 的总体架构采用了扁平化的无线架构原理，无线和核心网侧用户平面的处理都可在单网元内完成，如图 3.9 所示。其主要目的是保证可扩展性的方便，以免在业务增加时像 Release 6 那样在多层进行容量升级。Release 7 中也进一步演进了 HSPA，并增加了另一种架构选项，见第 14 章。但 LTE 中只有一个选项，即所有的无线包含在 eNB 中。

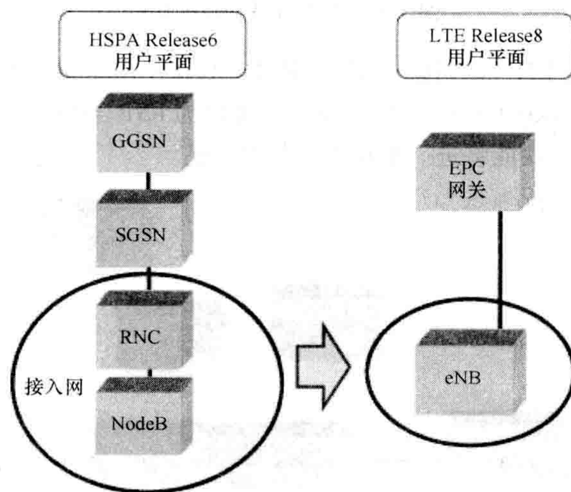


图 3.9　LTE 扁平化无线架构演进

LTE 无线中的控制面也基于单网元的无线接入网络原理，因此如图 3.10 所示，所有的无线协议在 eNB 终止。与核心网的连接通过 S1 接口实现，并且 S1 接口分为两个部分，从而满足用户面和控制面处理的最大灵活性。用户面使用 S1-U 接口，eNB 与 MME 之间的控制信息由 S1-MME 接口承载。LTE eNB 之间有 X2 接口支持无线资源管理（Radio Resource Management，RRM）。X2 接口主要用于控制面，但在移动性事件中也用于临时的用户数据转发，见 3.4 节。从网络规划的角度看，X2 接口是 eNB 之间的一个逻辑接口，而非任何物理连接。

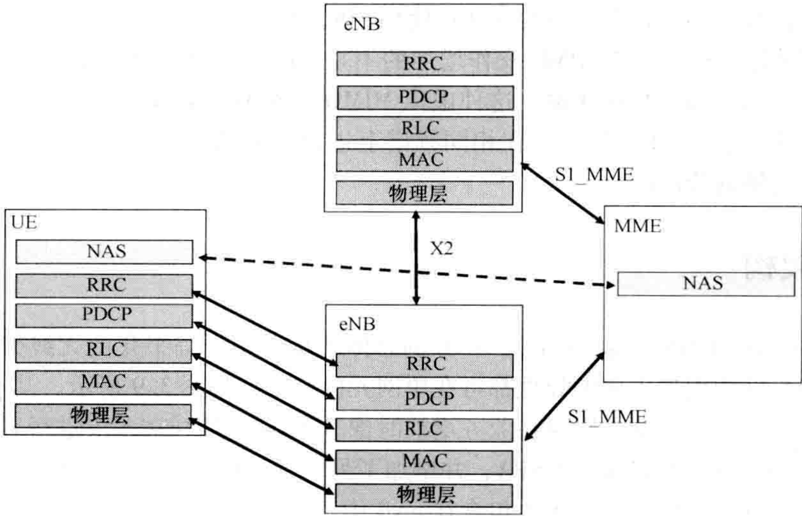


图 3.10　LTE 无线协议架构

图 3.11 所示为 LTE 无线接入网络（Radio Access Network，RAN）和演进分组核心网（Evolved Packet Core，EPC）。S1-U 接口为 eNB 与核心网网关之间提供数据。EPC 网元的核心功能将进一步在 3.5 节中阐述。

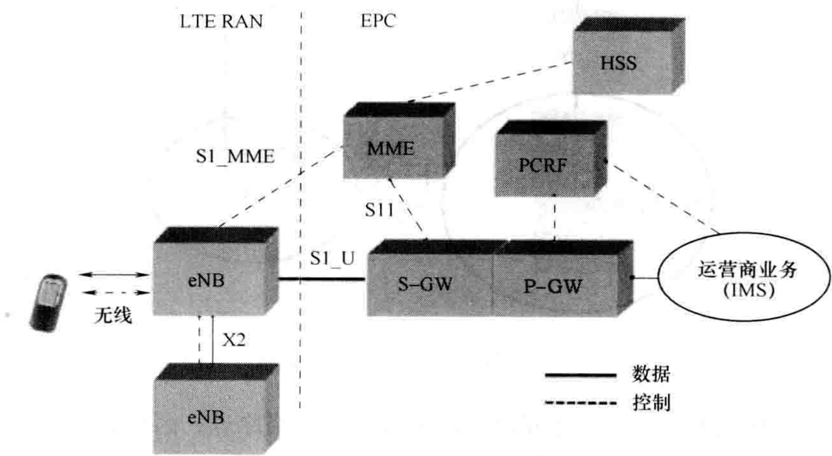


图 3.11　LTE RAN 和 EPC 的总体架构

3.4　协议

如图 3.11 所示，LTE 所有的用户面和控制面无线协议在 eNB 上终止。控制平

面侧无线资源控制（Radio Resource Control，RRC）协议为 UE 提供 RRC 控制信息，包括配置连接参数、移动性测量和过程控制、UE 向 eNB 的测量上报、网络向 UE 的切换命令等。与 HSPA 相似，LTE 使用相同的 ASN.1 解码，从而允许 3GPP 保持后向兼容时进行新的扩展。其与 HSPA 主要的区别在于只有两个 RRC 状态定义，如图 3.12 所示。

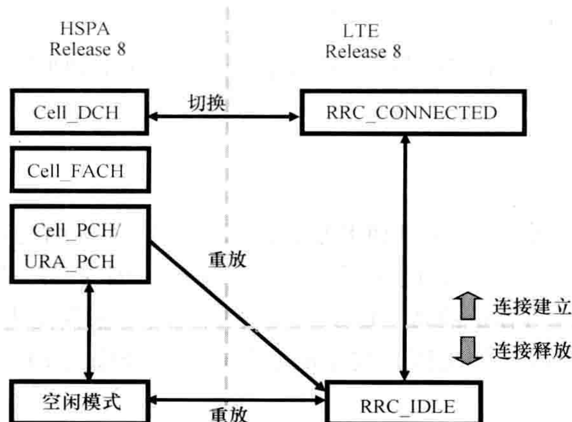


图 3.12 LTE 和 HSPA Release8 中的 RRC 状态

媒体接入控制（Medium Access Control，MAC）为层 2 协议，如图 3.13 所示，显示了向物理层的传输数据流的无线承载。MAC 具有以下关键功能：

① 物理层重传处理。

② 调度。

③ 优先级处理。

④ 不同逻辑信道向单传输信道的复用。

作为 MAC 层的功能之一，MAC 头包含控制信息，包括在下行链路上的上行时间提前、上行链路上的缓存状态报告，该报告可指示在缓存中等待传输的数据的数量和种类。MAC 层还用于控制不连续的接收和发送操作（DRX/DTX）。这对于在没有数据需要传输时，避免 UE 持续接收和发送以保持 UE 适当的功耗非常重要。

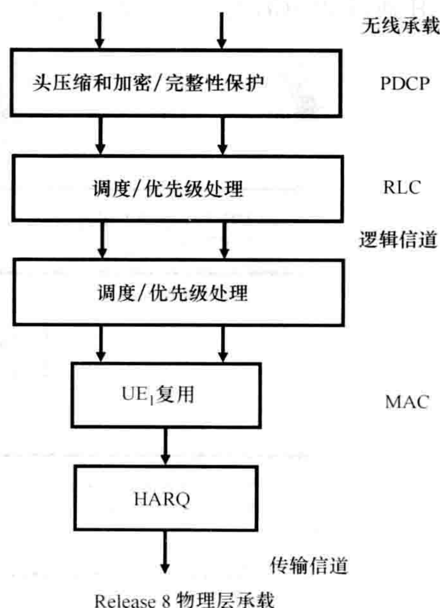


图 3.13 LTE Release 8 与 Release 9 的层 2 结构

无线链路控制（Radio Link Control，RLC）包含以下功能：

① RLC层确认模式（Acknowledged Mode，AM）处理业务重传；由于点对点业务无论如何都会有物理层的重传，数据包顺序可能改变，因此非确认模式（Unacknowledged Mode，UM）只提供数据包重排。

② 分段。

③ 上行逻辑信道的规定。

分组数据汇聚协议（Packet Data Convergence Protocol，PDCP）包含以下功能：

① 加密。

② 头压缩。

③ 完整性保护。

通常所有传输的数据都经过PDCP层，RRC信号除外，因为该信号向所有UE广播，没有必要加密。头压缩对于语音操作尤其重要，因为实际的头尺寸小，如果没有头压缩将有大量的容量浪费。Release 9完成了语音服务能力，包括支持优先的紧急呼叫和一些市场（如美国）要求的必要定位。详细的LTE语音解决方案见参考文献［2］。

UE移动性的处理是无线协议的一个重要过程。LTE UE同时只能连接到一个小区，因此在WCDMA中不能支持宏分集。UE会搜索小区（对于频率内小区，不需要邻居列表），然后在专用控制信道（Dedicated Control CHannel，DCCH）上报。DCCH通过PUSCH传输，eNB通过切换决策将UE切换至其他小区，如图3.14所

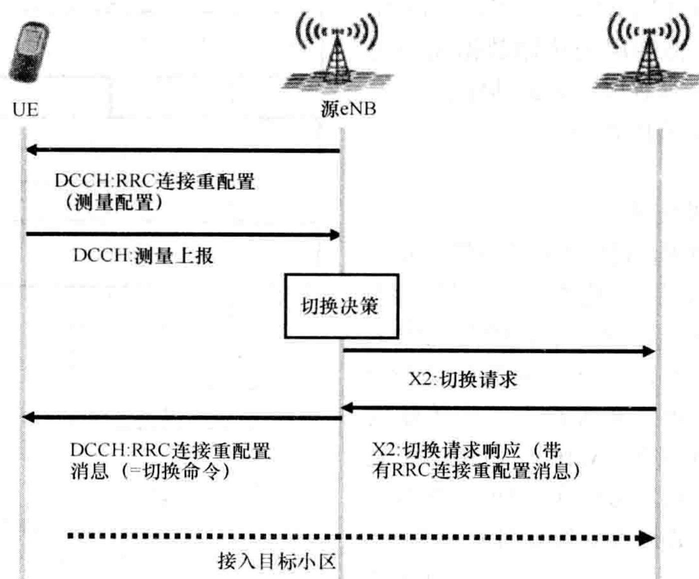


图3.14　LTE切换过程

示。在这种情况下，在核心网重排数据路径之前，源 eNB 通过 X2 接口将数据转发给目标小区。这使得数据流只有很短的中断，并且整个切换过程很快，因此一旦切换完成就可以到达核心网。

3.5 EPC 和 IMS

如图 3.15 所示，在核心网侧 EPC 和 IMS 这两个关键实体是分离的。所有的用户数据都要经过 EPC，同时与运营商 IMS 业务相关的数据（如 LTE 语音）需要经过 IMS，而因特网业务不需要。关键的 EPC 网元与功能如下：

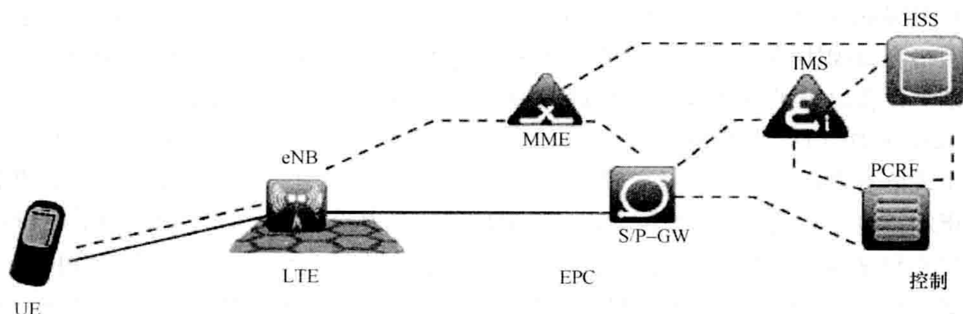


图 3.15 EPC 和 IMS

① 移动管理实体（Mobility Management Entity，MME）是 EPC 中的主要控制实体。MME 连接 eNB 为 UE 进行鉴权，且 MME 包括签约注册的必要信息。MME 由归属地网络获取签约配置，并据此决定 UE 运行哪种连接，包括最大数据速率等参数。

② MME 也参与移动性管理。MME 将跟踪 UE 在网络中的位置，指示网关提供 UE 的数据到何处，并在切换操作中更新该信息。在 RRC_ IDLE 状态下，MME 跟进 UE 的跟踪区域，这样使得当 UE 有呼叫时，网络知道从哪个小区寻呼 UE。

③ 业务网关（Serving Gateway，S-GW）的关键功能是根据收到的来自 MME 的指令处理用户数据隧道。当 UE 在激活状态下移动进入网络时，S-GW 如同锚点那样保持不变，将数据路由到正确的 eNB。但是也有 UE 从一个 S-GW 改变到其他 S-GW 的可能。S-GW 从 P-GW 接收数据包。

④ 分组数据网关（Packet Data Network Gateway，P-GW）是 LTE/EPC 与外部网络之间的边界路由节点，具有业务门限与过滤功能。

⑤ 政策与计费规则功能（Policy and Charging Resource Function，PCRF）进行政策与计费控制（Policy and Charging Control，PCC）。

IMS 是 LTE 和 EPC 提供的 IP 连接层之上的业务层。IMS 被设计为与 3GPP 定

义的接入网无缝工作。IMS 业务有自注册和会话管理过程，通过使用 SIP 发起和控制会话。IMS 架构的具体细节见参考文献［1］，使用 IMS 传送 LTE 语音（Voice over LTE，VoLTE）见参考文献［2］。IMS 与 EPC/LTE 采用相同的方法通过数据库归属用户服务器（Home Subscriber Server，HSS），获取用户数据。

3.6 Release 8 与 Release 9 UE 的能力与区别

在 Release 8、Release 9 中定义了 5 种 UE 类别。UE 不会发送关于自身能力的信号，但是基于 Release 8（Release 9）的 5 种 UE 类别之一。类别 1 的数据速率为下行 10Mbit/s 以上，上行 5Mbit/s 以上。但市场上的第一阶段的 UE 基于类别 3，当网络有 20MHz 带宽时，峰值数据速率可达到下行 100Mbit/s，上行 50Mbit/s。除类别 1 设备以外的所有 LTE UE 都具有下行 MIMO 能力，见表 3.3。Release 8 与 Release 9 中的 UE 类别相同。Release 9 的增强不影响 UE 的峰值速率，而主要是为了实现语音增强。除了参考文献［3］中描述的 UE 能力，参考文献［4］中功能组指示符也通知网络 UE 是否测试过针对网络中的某个特性，如特定的信道质量反馈模式和是否能为 UE 激活相关特性。这样，就允许了当前市场上反应网络目前实际支持特性的 UE，可以支持网络后续引入的特性。半持续调度（Semi-Persistent Scheduling，SPS）就是这个特性的例子，为多个传输机会（重复）预留资源。由于 SPS 主要，但不是全部，用于当 UE 使用语音时降低信号负载，目前还未在网络中广泛部署，因此 UE 可能指示（当 UE 连接网络时）该 UE 的 SPS 尚未测试，从而使 eNB 知道不要为该 UE 激活 SPS。一旦测试的能力提升，标准可能在某个版本（见参考文献［4］的附录）后，更新要求设置某个特定的 FGI 比特为真。在 2012 年 3 月以后的版本中，对于某些特性，FGI 比特在 FDD 和 TDD 模式下可能有所不同，参见参考文献［4］。

表 3.3　Release 8 与 Release 9 的 UE 类别

UE 类别	类别 1	类别 2	类别 3	类别 4	类别 5
上、下行链路峰值数据速率/(Mbit/s)	10/5bit/s	50/25bit/s	100/50bit/s	150/50bit/s	300/75bit/s
RF 带宽/MHz	20	20	20	20	20
下行解调	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
上行解调	16QAM	16QAM	16QAM	16QAM	64QAM
接收分集	是	是	是	是	是
基站发射分集	1～4TX	1～4TX	1～4TX	1～4TX	1～4TX
MIMODL	可选项	2×2	2×2	2×2	4×4

与 Release 8 相比，Release 9 的主要区别如下：

① 引入前面提到的 TM8，以支持采用波束赋型天线同时进行多流 MIMO 传输。

② 引入支持优先级的 IMS 紧急呼叫的协议。

③ 引入基于 UE 的定位解决方案，相比仅基于卫星的方案，该方案基于 UE 可观察的到达时间差（Observed Time Difference Of Arrival，OTDOA）以提供进一步的 UE 定位方法。

④ 引入另一种基于语音识别的 CS 回退临时解决方案，这是在更快的解决方案如 PS 切换和最终的 VoLTE 部署前的过渡方案。

⑤ 引入多媒体广播多播系统，支持 LTE 在单频网络（Single Frequency Network，SFN）配置下使用广播业务。

因此基于这些区别，Release 9 的性能与 Release 8 并没有很大不同，尤其是不使用波束赋型天线时。但是对紧急呼叫的支持和新增的定位方案，对基于 LTE 的语音解决方案是非常重要的，详见参考文献 [2]。

3.7 小结

在前面的内容中，已概述了 LTE Release 8 和 Release 9 的主要原理，其中绝大部分在 LTE-Advanced 中仍然有效，Release 10 在此基础上进行增强以提升性能与数据速率。架构方面，Release 10 新增的网元只有中继，其余架构没有改变。协议方面的改变大部分限于为引入 Release 10 新特性的必要参数化。LTE Release 8 与 Release 9 已是良好的网络部署基础。Release 9 的增强主要集中在实现 LTE 语音支持，Release 10 与 LTE-Advanced 及以后的版本将展示一旦数据传输需求进一步发展该如何提升系统，见后续内容。

参考文献

1. Holma, H. and Toskala, A. (2011) *LTE for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
2. Poikselkä, M. *et al.* (2012) *Voice Over LTE, VoLTE*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
3. 3GPP Technical Specification, TS 36.306 (December 2011), LTE UE capabilities, version 9.6.0.
4. 3GPP Technical Specification, TS 36.331 (March 2012), LTE Radio Resource Control, version 9.10.0.

第4章 下行链路载波聚合

Mieszko Chmiel, Antti Toskala

4.1 简介

本章介绍了 LTE 技术规范 Release 10 中的 LTE 下行链路载波聚合技术。首先，我们重点介绍了下行链路载波聚合技术的基本原理；之后，我们给出了具体的协议、流程和物理层方面的相关内容。最后，对下行链路载波聚合技术的性能进行评估，以及对 3GPP 无线标准中的下行频带组合工作做了总结。

4.2 载波聚合技术的基本原理

Release 8 中 LTE 下行链路载波的最大带宽是 20MHz。由于运营商所获得连续带宽很少超过 20MHz，这就使得绝大多数频带的 LTE 调度非常方便。当需要通过大带宽来提升数据速率时，通常想到的是更大的频谱带宽，但是连续频谱资源的缺乏将这种想法的可用性限制在极少数的频带上。解决方案就是通过载波聚合将多个 20MHz（或更小）的带宽聚合给同一个 UE 使用。UE 可以同时接收多个频带的载波。这种来自不同频带的载波聚合技术就是带间载波聚合。从运营商的角度看，通过带间载波聚合将两个 10MHz 的带宽聚合在一起也是一个非常有吸引力的应用场景。通过带间载波聚合，运营商可以用一些不连续的频谱达到与 20MHz 带宽相同的 UE 峰值数据速率。如图 4.1 所示，即便运营商在同一个频带内有超过 20MHz 的带宽，带间载波聚合技术也同样可以得到应用。应该考虑如何保持与较早的 LTE 版本中的 20MHz 带宽的后向兼容性。如图 4.2 所示，一个 Release 8 的 UE 可能通过一个单载波接入网络，然而一个拥有 Release 10 载波聚合技术的 UE 可以在不影响 Release 8 或 9 终端的条件下，通过载波聚合能力使用多个载波接入网络。

Release 10 中每一个独立的载波都有 Release 8 中 UE 所必需的功能，包含主同步信号和辅同步信号以及第 3 章中提到的广播信道和常用的参考信号。

当来自同一个 eNB 的两个载波在传输相同信息时，会产生一些额外功耗。然而为了确保后向兼容性，这是非常必要的。

为了降低给 UE 带来的复杂性，带内和带间载波聚合都被限制在仅仅聚合 2 个

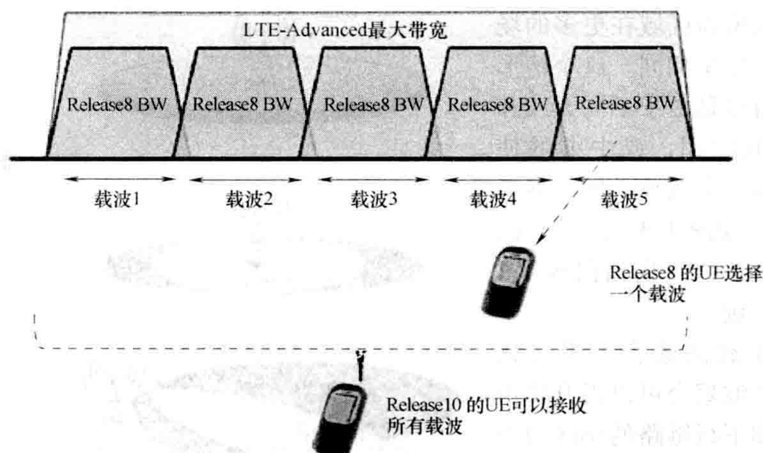


图 4.1　基本的载波聚合原理

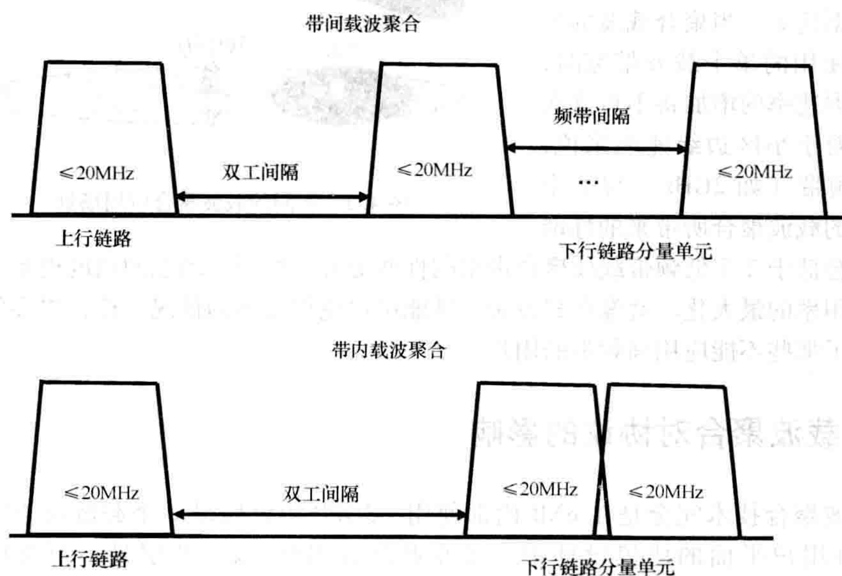


图 4.2　LTE 下行链路带内和带间载波聚合技术原理

载波的阶段。技术规范设定的原则最多允许 5 个载波聚合，但是在 RF 和性能规范中，第一阶段仅仅考虑 2 个下行链路子载波的聚合，随后会与频带聚合技术相结合。在第 5 章中，同样也只在第一阶段考虑 2 个载波。

如图 4.3 所示，载波聚合有不同的应用场景。聚合后的 2 个载波既可以有完全相同的覆盖区域也可以有不同的覆盖范围。另外，如图 4.3 所示，根据载波频率的不同或射频拉远头（Remote Radio Head，RRH）的使用（图 4.3 中的 b、c、d），

两个载波的覆盖区域在更多的场景下也不会完全相同。这个情形的结果也可以是由于不同天线和天线倾角的使用，或中继的使用，只影响一个载波，例如参考文献［1］。如图4.3的c，是假定频率2的天线方向指向频率1的弱覆盖区域。

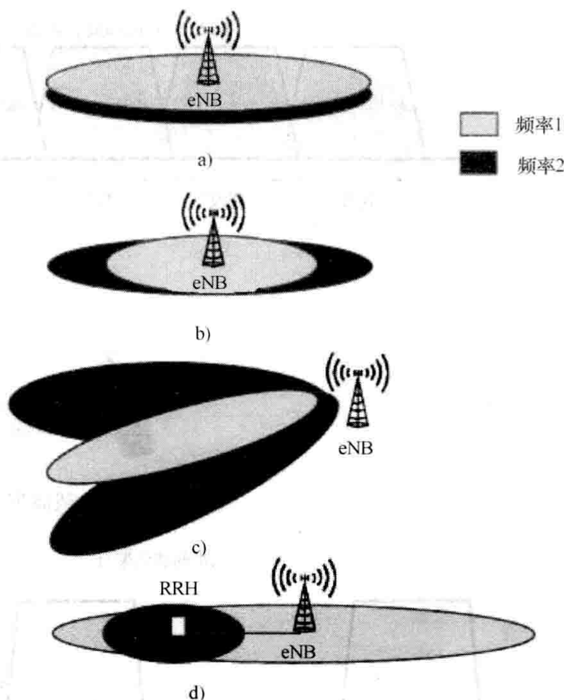


图4.3 不同的载波聚合应用场景

得益于载波聚合的带宽比率，应用载波聚合可以提升峰值数据速率和下行链路的小区边缘速率。使用两个20MHz的子载波将会得到两倍于Release 8的峰值数据速率。当聚合载波的带宽小于使用的单个载波带宽时，峰值数据速率的增加将不再这么显著。对于小区边缘速率来说，1个高频带（如2GHz）与1个低频带的载波聚合所带来的性能提升将会低于2个低频带载波聚合带来的性能提升。然而，动态的调度机制允许高频带使用率的最大化。就像在载波聚合性能中讨论得较多的情况一样，更多的低频带留给了那些不能应用高频带的用户。

4.3 载波聚合对协议的影响

载波聚合技术完全是在eNB内部使用。3GPP协议假设2个载波属于同一个eNB。在用户平面的协议设计中，载波聚合对MAC以上的层是不可见的。在Release 8中，逻辑信道由无线链路控制层提供，如果可以使用载波聚合，MAC层会将数据分散放置在多个下行链路载波（即通常所说的下行链路载波单元，DCC）上。在考虑所有载波后，MAC层会将传输时机通知RLC层以便它相应地生成PDU。这可以通过第3章中所提到的RLC层和MAC层的协同功能实现。如图4.4所示，每一个载波都有独立的物理层重传机制。由于每个UE仅有一个RRC连接，因而在调度中每个UE的所有HARQ实体都使用同一个C-RNTI。

MAC层的调度函数通过反馈回来的载波自身质量（就像接下来物理层方面的讨论那样）以及一些其他的有效参数（如每个载波的负荷等）来决定具体使用哪

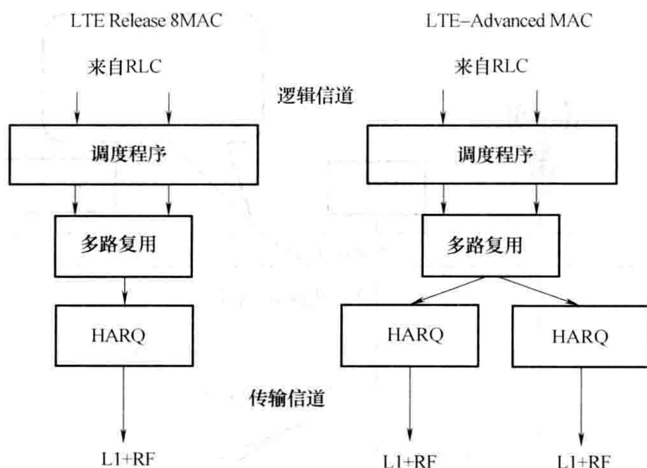


图 4.4　有载波聚合的 MAC 层结构

些载波单元。图 4.2 给出了一个聚合小区的常规调度方案。需要注意的是，通过整合调度决策，非连续载波聚合调度也可以实现与常规调度相同的功能。Release 10 的载波聚合和 Release 8 的单载波操作在 RLC 层以上的其他层以及在分组数据汇聚协议（PDCP）层的处理都是一样的。PDCP 功能如加密和数据头压缩的处理与 Release 8 相同，无论是否得到确认下，提供给 MAC 层的数据都要经过 RLC 层。每一个载波的操作，包括物理层和 HARQ 操作，都是相互独立的。当一个载波上的传输块传输失败时，需要在同一个载波上进行 HARQ 重传，该重传的原理和流程与 Release 8 的 HARQ 重传一致。在每个传输时间间隔（Transmission Time Interval，TTI）里，UE 在每个载波单元上都可以分配到一个单独的传输块。未来的载波聚合会增加每个 TTI 里传输资源块的最大数目。

不论使用了多少个载波，每个 UE 都只会有一个 RRC 连接。只有切换才能改变或移除主小区（Primary Cell，Pcell），否则它将一直是有效的。就像早先的 LTE 版本一样，如由 PCell 决定无线链路失败等错误情况。

图 4.5 中的信号流程给出了默认承载的发起和建立过程（假设在此之前已经完成了第 3 章中所讨论的 RRC 连接建立过程）。默认承载的建立是为了实现 UE 和其余网络之间的数据通信，在此之后，会对载波聚合配置 RRC 连接重置消息（如果在 UE 端和 eNB 端都可以的话）。通过建立默认承载，核心网控制载波聚合所使用的数据速率（以及其他的 QoS 参数）。RRC 连接重配置消息包含下行载波聚合所需要的参数，如 PCell 和辅小区（Secondary SCell）信息等。诸如安全配置和 NAS（Non-Access Stratum，非接入层）信息等连接建立时的初始操作都是由 PCell 完成的。

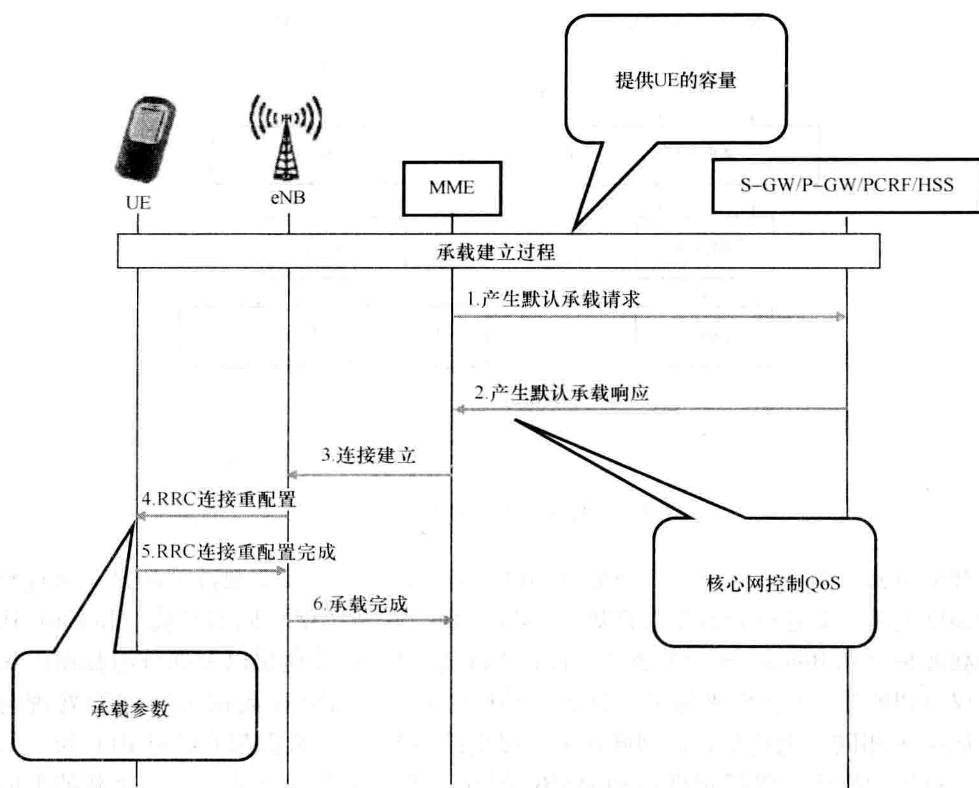


图 4.5　载波聚合存在时的 RRC 连接建立

一旦完成 RRC 连接重配置步骤后，MAC 层就可以激活配置好的 SCell。MAC 层 SCell 激活后，UE 获得相应的 MAC 层控制因子。这就使得在数据传输和无线条件发生改变时，MAC 层小区的激活、禁止和重新激活成为可能。RRC 层配置以及 MAC 层的激活和失效的目的是为了降低终端功耗。当 eNB 没有数据要传给 UE 时，关闭额外的接收部件就显得很重要。当没有发生数据传输时，UE 不仅可以避免额外的射频器件（进行频带间操作）造成的功耗，还可以省去对多载波上控制信号的解码。此外，当一个 SCell 失效后，UE 就不再测量或报告这个小区的 CSI。SCell 激活时，在 8 个子帧之后 UE 才可以开始接收数据，如图 4.6 所示。在包含 MAC 控制因子的 TTI 之后，UE 有 7ms 的时间来解码，处理自身的事情以及激活射频接收部件。

如图 4.7 所示，当 SCell 在一定周期内没有用户数据时，SCell 可以通过一个可配置的去激活定时器去激活。

加入载波聚合之后，系统的移动性几乎保持不变。UE 将会基于 PCell（在早期的 LTE-Advanced 技术规范版本中也被称作主分量载波（Primary and Changing Con-

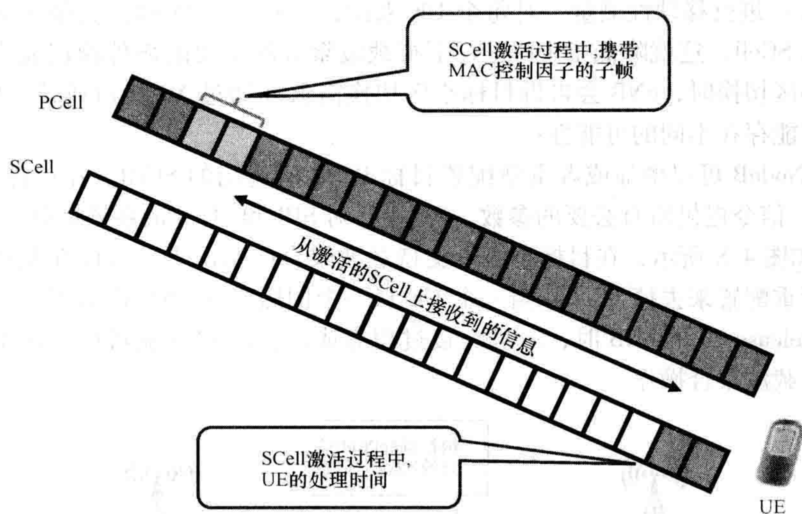


图4.6　SCell 激活时 UE 的处理时间

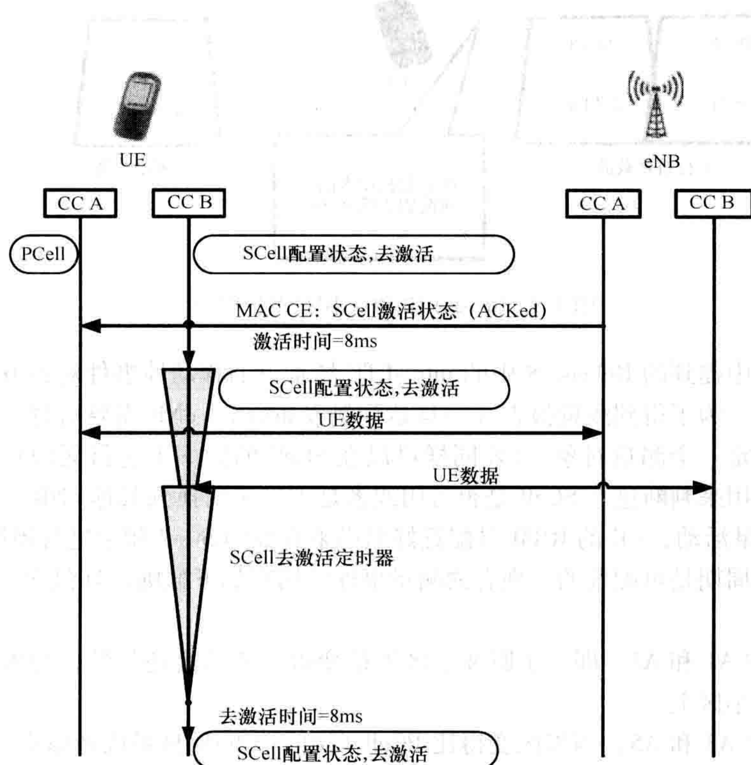


图4.7　定时器使 SCell 去激活

trol，PCC）进行移动性测量。对每个 UE 来说，只有一个 PCell，其他所有聚合载波都来自 SCell。这就降低了 UE 进行下行载波聚合所需要的额外测试能力。当需要进行小区切换时，eNB 会告诉目标小区切换需求（通过 X2 接口或核心网）。切换处理可能存在不同的可能性：

① eNodeB 可以增加或者重新配置目标 PCell 所选用的 SCell。在这种场景下，专用 RRC 信令提供所有必要的参数，UE 不必对 SIB 和 SCell 的系统信息进行解码。

② 如图 4.8 所示，在目标小区不支持载波聚合的情况下，可以在发送切换信息时进行重配置来去掉 SCell。当一个 UE 从一个旧版本的 eNB 移动到一个支持载波聚合 Release 10 的 eNB 时，一旦交接过程完成，新的 eNB 就可以发送重配置信息来建立载波聚合操作。

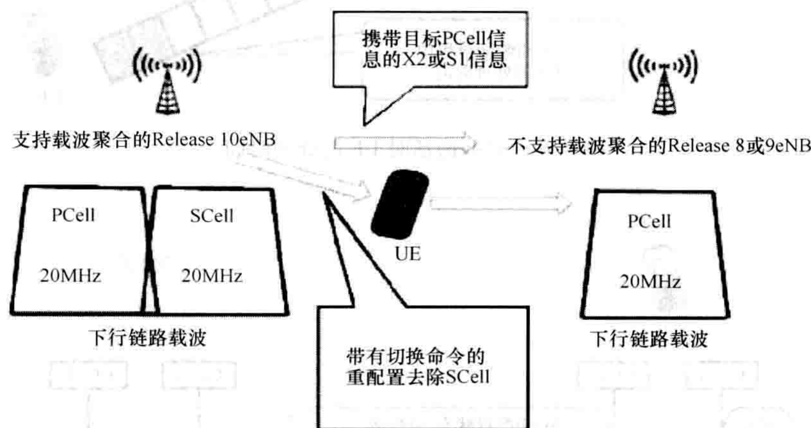


图 4.8 Release 10 和 8 小区间的移动性

第 3 章中提到的 Release 8 中的 intra-LTE 场景下的移动性事件对载波聚合基本也是有效的。为了得到测量报告（一旦达到触发条件），eNB 需要对每一个分量载波的频率设定一个测量对象。UE 同样可以在 SCell 的频率上进行无缺口测量，这些测量可以用来判断这个 SCell 是否可用或者是否应该切换到其他 eNB 上。为了减少 UE 的测量活动，UE 的 RRM 对配置好但尚未有效的 SCell 频率进行周期性测量，且这个测量周期是可配置的。现有的测量事件应用有如下准则，且包含一个新的测量事件：

① 事件 A1 和 A2，即一个服务小区不论变得比阈值高还是低，均可以配置到所有的服务小区上。

② 事件 A3 和 A5，当邻区变得比 PCell 高出一定的偏移量或者像事件 A5 一样 PCell 处于一个绝对值之下，而邻区处于这个绝对值之上时，邻区就可以配置到 PCell 和 SCell 的频率上。

③ 为载波聚合引入了一个新的测量事件 A6。测量事件 A6 指的是同频邻区相对于目前的 SCell 好了一定的偏移值。设置一个相对较高的偏移量要求可以用来避免不必要的测量报告，但是参数值的设定会受到 PCell 位置的影响（如预期的相关覆盖范围等）。在图 4.9 所示的配置场景中，不同的载波聚合天线指向不同方向的地理区域，此时事件 A6 就会非常有用。

图 4.10 给出了载波聚合存在情况下与 PCell 相关的测试事件。现有的 Release 8 的异系统测量没有发生改变。

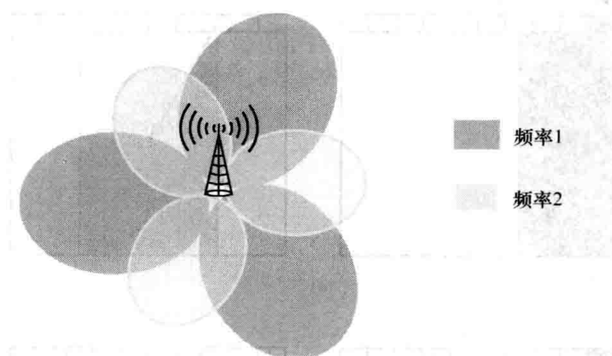


图 4.9　事件 A6 的一个部署场景

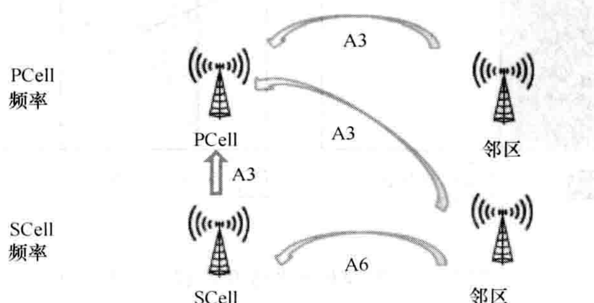


图 4.10　载波聚合存在时的新的测量事件 A6

在空闲状态下，与 Release 8 相比操作上没有发生改变。在转换到 RRC 连接状态且 eNB 对载波聚合进行配置之前，Release 10 的 UE 不会表现出任何不同（前提是 eNB 支持载波聚合，且 UE 表明有能力在给定的组合频带进行载波聚合）。

4.4　载波聚合对物理层的影响

就 Release 8 的 UE 来说，单个载波没有发生变化。有两种模式将 PDCCH 和相

应的 PDSCH 或者 PUSCH 联系起来：

① 常规的调度操作：PDCCH 和相应的数据信道在同一个服务小区上传输信息。

② 跨载波调度操作：PDCCH 可以在一个与相应的数据信道不同的可配置的服务小区上进行传输。

图 4.11 给出了这两种模式。

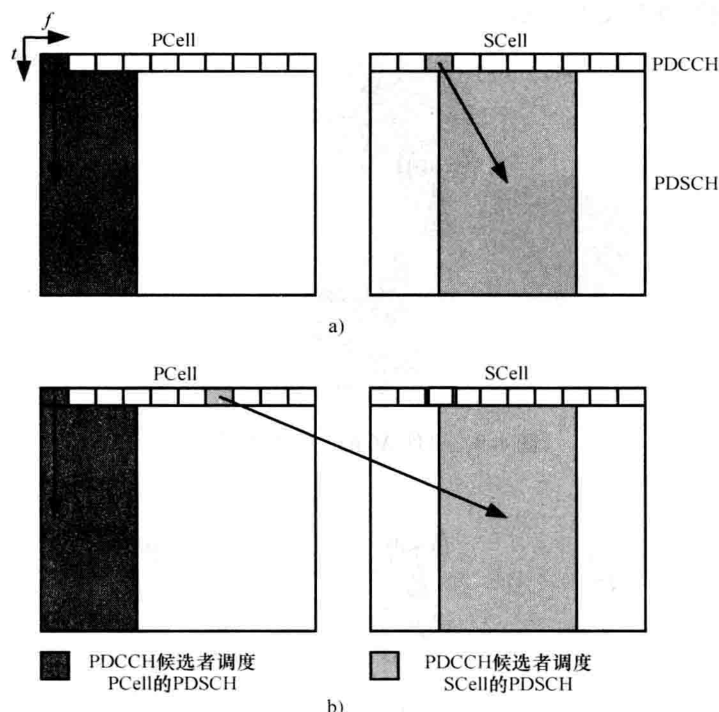


图 4.11 常规载波调度和跨载波调度操作

为了支持跨载波调度的载波聚合，将 CIF（Carrier Information Field，载波指示域）添加到 PDCCH 内容中，以指出用户打算用哪些下行链路载波做资源分配。通用的设计准则最多允许使用 5 个分量载波，但是在最开始的部署中（包括性能需求和带宽组合），只使用了两个工量载波。使用跨载波调度允许动态分配更多的 PDCCH 资源，如图 4.12 所示，对于具有载波聚合能力的 UE 来说，两个载波上的 PDCCH 信息传递能力得到了合并。只有通过其他服务小区的 PDCCH 才能将一个 SCell 调度给一个 UE 使用。然而，在这个服务小区上用来为 UE 调度多个小区的 PDCCH 搜索空间是可以共享的。

跨载波调度有利于异构网络下的操作。PDCCH 重叠区域可能会产生干扰，通

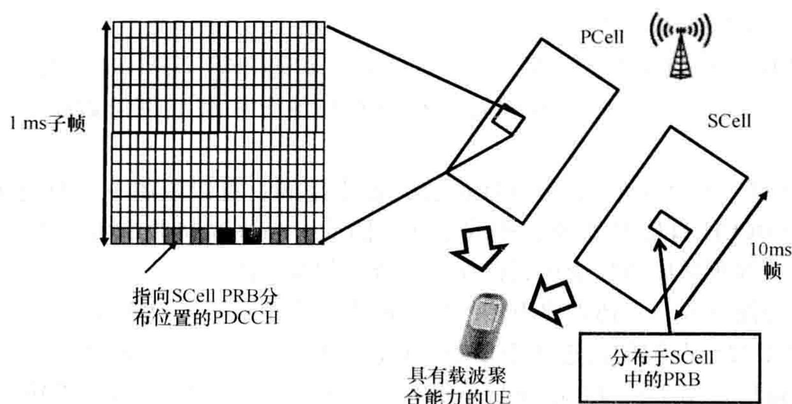


图 4.12　具有载波聚合能力的 UE 的跨载波调度

过在微小区中使用其他频率上的 PDCCH，重叠区域也可以充分受益于数据部分的使用（宏小区的功率较小），如图 4.13 所示。宏小区可能会拒绝使用其他频率上的 PDCCH 从而确保微小区可以在这个载波上得到无干扰的 PDCCH。对于 PDSCH 的数据部分，不存在干扰的位置可以用来进行正常的频域调度，它不会强调 PD-CCH 部分在整个载波带宽上发送。这可以与第 8 章中介绍的强调时域协调的加强

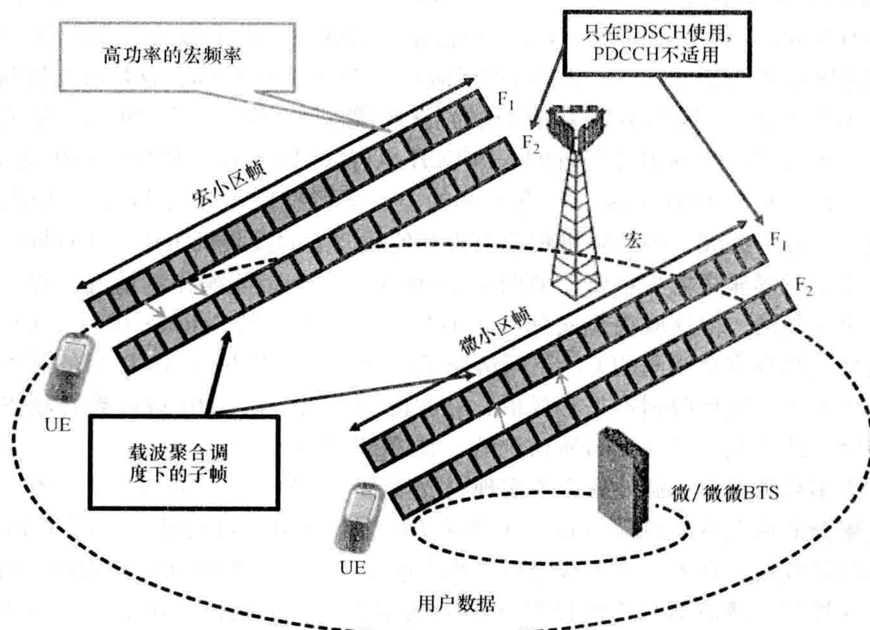


图 4.13　使用跨载波调度来促进异构网络部署

的小区间干扰协调方法相结合。

PDCCH 上的 CQI 请求（第 3 章中所介绍），现在有不止 1bit 可用，它不再仅仅指示是否应该发送报告。有问题的载波和其他分量载波都可以被要求来发送报告。

只允许在 PCell 上使用 PDCCH 的公共搜索空间，可以限制一个具有 LTE 功能的 UE 在 PDCCH 盲检时处理步骤的增加。因此，当终端接收载波的数量增加时，导致处理步骤所增加的数量将保持在一个合理的范围内。

在上行链路方向，还需要更多的信令能力来满足增长的反馈需求：

① 针对多个载波的信道状态信息（Channel State Information，CSI），包括每个载波的信道质量指示符（Channel Quality Indicator，CQI）和必要的 MIMO 相关的反馈信息。多个载波的 CQI 信令是通过 PUSCH 资源传输的。如果周期性的 CSI 和非周期性的 CSI 之间出现冲突，在上行链路方向周期性的 CSI 将会被丢弃。CQI 请求之后的 CQI 传输将在 PUSCH 上分配的上行资源上进行。通过 RRC 配置对不同小区的报告进行时分复用，这样多小区的周期性 CQI 报告就可以在 PUCCH 上进行传输。

② 物理层的重传将多个下行链路载波的 ACK/NACK 反馈和一个传输块是否被成功接收的指示联系起来。在 Release 8 中，ACK/NACK 信令仅仅支持一个单一载波上的资源块。

新的 PUCCH 格式 3 可以携带 10 个 ACK/NACK bit（TDD 格式下可携带 20 个 ACK/NACK bit），这样就可以为 5 个下行链路分量载波提供足够的信令能力。此外，带信道选择的 PUCCH 格式 1b 最多可以反馈 4 个 ACK/NACK bit，这足够支持两个小区进行载波聚合了。PUCCH 只在 PCell 的上行链路进行传输。当 CQI 请求触发的非周期性 CQI 反馈在 PUSCH 上传输时，PUCCH 也可以用来传输周期性的 CQI 反馈。

特别地，对于 TDD 来说，所有小区的上、下行链路子帧分割必须是相同的。不然的话，某个载波上的接收机将会阻碍其他载波上的接收机工作。这在同一个频带内操作的时候显得尤为重要，如图 4. 14 所示。对于带间操作的情况，理论上来说可以更为灵活，但这取决于实际考虑的频带。然而，在 Release 10 中，UE 假设所有的载波都有完全相同的上、下行链路子帧分割，在 Release 11 以后的版本会设计得更为灵活。这种限制不是必要的，在实际中，第一次 TDD 载波聚合场景就是频带内聚合的情况（如 4. 6 节所讨论的，频带 38 或 41）。

在大多数情况下，载波聚合的实现需要增加一个独立的接收机分支。在带内相邻载波聚合的情况下，仅仅通过一个宽带 RF 前端就可以进行处理。图 4. 15 中给出的示例接收机，在差异化天线之后，拥有确定带宽的接收机部件。假设上行是单天线，这样双工滤波器只需要接到众多天线中的某一个就行。在带内（不相邻载波）聚合的情况下，仅仅需要一个确定带宽的滤波器（接收滤波器或双工滤波器），这取决于发射端是在与主接收机还是分集接收机通话。

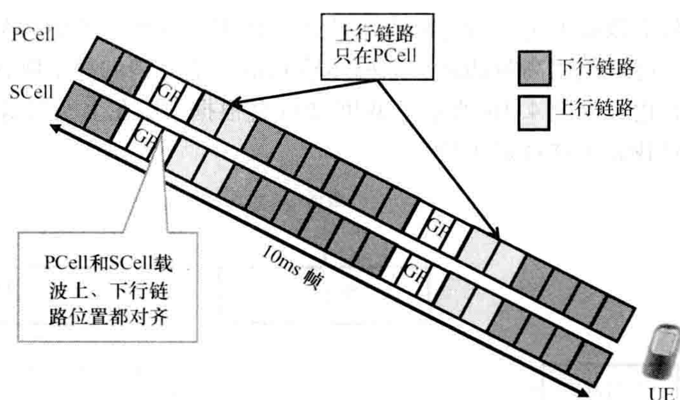


图 4.14　LTE TDD 下行链路载波聚合

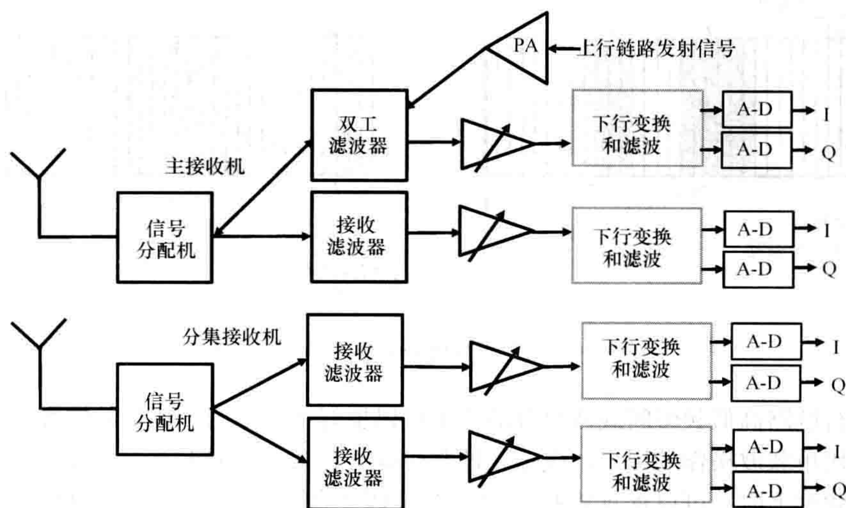


图 4.15　带间下行链路载波聚合场景下的 UE 收发机

4.5　性能

在本节，我们从理论和仿真两方面研究了载波聚合的好处。载波聚合获得的性能增益主要来自以下 4 个方面：

① 负载均衡；

② 资源共享；

③ 多个载波间的联合频域调度；

④ 对于一个给定应用给予更多的带宽使得峰值速率得以提升。

与单载波操作相比，载波聚合拥有更大的空间来进行频域调度，这是因为它根

据 CSI/CQI 在两个载波上选择较好的资源块进行使用。这使得其更容易找到在衰落和干扰场景下，可以使用高阶调制、双向传输和低信道开销的高信噪比资源块，将系统的容量极大化。如图 4.16 所示，调度器将会根据 UE 在上行链路反馈的信息从两个下行链路载波中选择资源块。

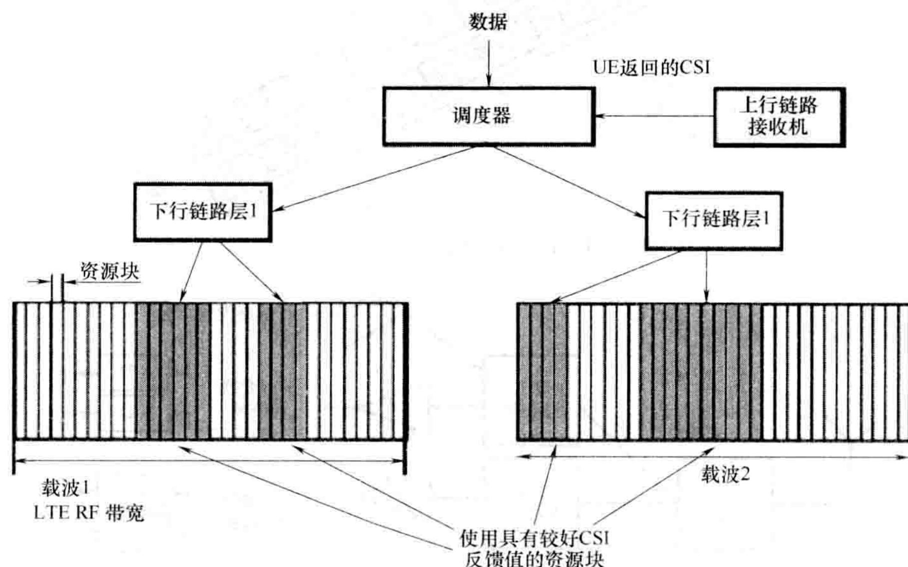


图 4.16　两个下行链路载波间的频域调度

下行链路高低频带间载波聚合的应用可以更好地利用两个频带的资源。在高频带有使用单载波操作的用户，应该在低频带操作以确保维持连接。当 PCell 工作在较低的频率上时，可以保证维持连接，但是调度器可以根据反馈的 CQI 将部分流量放在较高的可用频率上。这样，高频带的可用区域就会增加，为那些不能利用高频资源的用户省下了有价值的低频段资源，如图 4.17 所示。不允许常规切换所需要的滞后和延迟对衰落、载波负载和干扰的及时变化产生响应。通常，低频带频谱

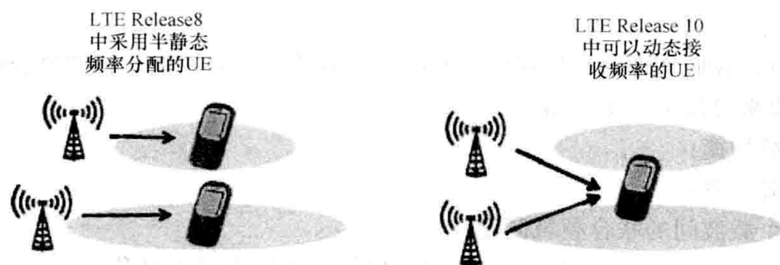


图 4.17　下行链路载波聚合场景下的动态频率选择

要少于高频带频谱，载波聚合的使用就使得 LTE 更具吸引力，因为在低频带它不再受 10MHz 带宽的 LTE 配置支持的数据速率限制。

在两个高频带（或低频带）进行载波聚合或者带内载波聚合的情况下，两个载波更为均衡，大部分用户随时都可以使用这两个载波（在带内载波聚合情况下，两个分量载波之间的平均路径损耗没有明显区别）。对于一个给定的用户，两个大量的可用带宽将会直接提升用户数据速率的平均值。可用载波上的用户和通信量越少，用户数据速率均值的提升就会越高。在存在大量用户的条件下，它可以在所有的载波上为用户提供一个良好的可能性调度，而对于一个具有载波聚合能力的装置在性能方面仍有优越性。在一个低负载的网络中，使用两个相等带宽载波的终端用户的平均数据速率大约是使用单个载波的终端用户的 2 倍，如图 4. 18 所示。

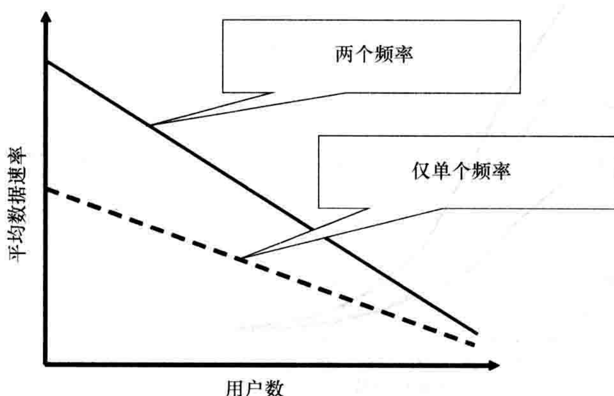


图 4. 18　两个频率的载波聚合对用户数据速率的影响

两个（将来可能更多）载波的资源共享有助于将可达到的能力最大化。使用集中的资源可以避免由于两个载波间瞬时负载的不均匀分布而产生的限制，这就使得载波聚合操作对下行信令能力和 eNB 调度能力的潜在限制不太敏感。

图 4. 19 给出了下行链路载波聚合场景下性能仿真结果的示例。在图中，将使用两个 20MHz 分量载波与使用单个 20MHz 载波的各种情况进行了对比。平均用户吞吐率是提供的负载的函数。从结果（单位是 Mbit/s）可以看出，与使用单载波的用户相比，使用两个载波聚合的用户的吞吐率有显著的提升。图 4. 19 只是给出了整个小区范围内吞吐率性能的提升结果，图 4. 20 则给出了小区边缘用户吞吐率性能的提升结果。随着负载的增加，两个载波下使用完全 CQI 情况的性能与使用 Release 8 中 CQI 情况的性能逐渐趋于一致。

对于小区边缘用户来说，好的 CQI 尤为重要，从小区间干扰的角度来看，它可以使用户选择较好的频点，从而使资源块受到最小的干扰。当小区内有众多的用户时，将导致不会有那么多的好处可以分配，小区边缘用户将会被配置到单载波操

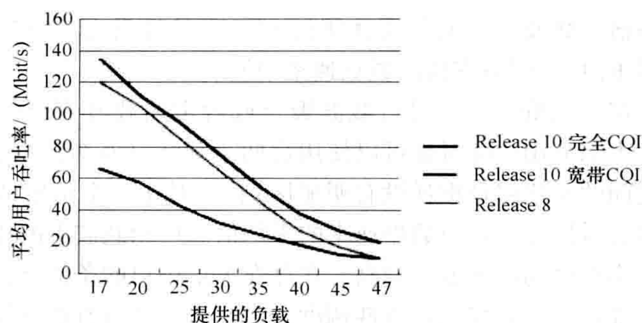


图 4.19 下行链路载波聚合时的小区平均用户性能

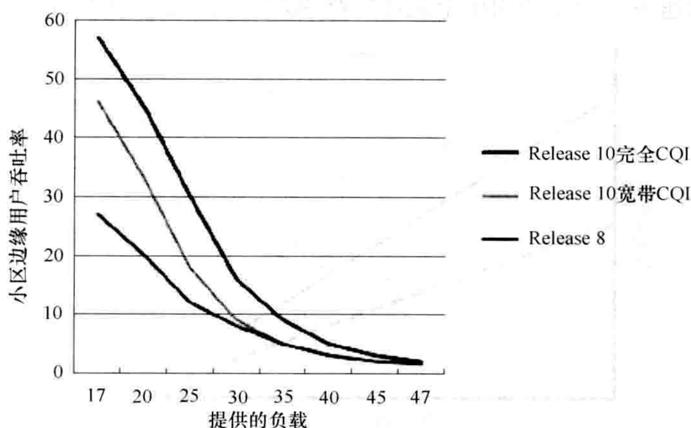


图 4.20 下行链路载波聚合时的小区边缘性能分析

作以减少信令开销。

对峰值数据速率的影响可以通过将每一个分量载波上的峰值数据速率简单相加来计算。一个拥有两个接收天线的 Release 8 LTE UE 可以在单个载波上支持 150Mbit/s 的速率，这样一个 Release 10 的 UE 可以通过聚合两个分量载波达到 300Mbit/s 的峰值数据速率。一个使用 4 流 MIMO 的 Release 8 单载波的数据速率是 300Mbit/s，当提升到 8 流 MIMO 之后，每个载波的速率可以达到 600Mbit/s。当对 5 个分量载波进行聚合时，峰值数据速率可达到 3Gbit/s。第 12 章详细地解决了 UE 的分类问题。

4.6 载波聚合的频带组合

3GPP 规定了多种频带组合来支持 LTE-Advanced 的载波聚合操作。对于一个特定的区域或国家，每种频带组合的方式通常都是确定的。随着工作的推进，下行链

路频带组合首先将会被做出明确的界定。本节给出了 3GPP 针对不同区域所讨论的旨在 2012 年完成的第一阶段频带组合的例子。值得注意的是，基于 Release 10 以上规定的下行链路频带组合可以独立释放，因此可以通过执行 Release 10 的规范将其在 UE 端进行应用。一个 UE 只需要额外地处理相关的性能需求和可能的具体频带组合信令。在独立释放规范之下，可以在 Release 10 之后增加一个频率段然后实现 Release 10 兼容的频带组合载波聚合。这个实现在 Release 10 以上的技术规范中完成。在后期特定频带的工作中，在实现时仅仅考虑特定频带的信令扩展和增强的性能需求。

在欧洲国家，一个典型的运营商在不同的频带上均有可用的频谱，包括 800MHz（即使还未拍卖，也已经有许多国家的拍卖过程即将展开）、900MHz（最初是 GSM 频带，现在也有一部分已用于 UMTS）、1800MHz（最初是 GSM 频带）、2100MHz（最初是 UMTS 频带）和 2600MHz（LTE 预期频带）都参与最近的拍卖。在第一阶段将会有 3 个频带用于载波聚合，如图 4.21 所示。欧洲国家还有其他的频带可用，例如 3.5GHz。但是如果一个运营商拥有图 4.21 中的频带后，3.5GHz 频带对它来说不是必要的。

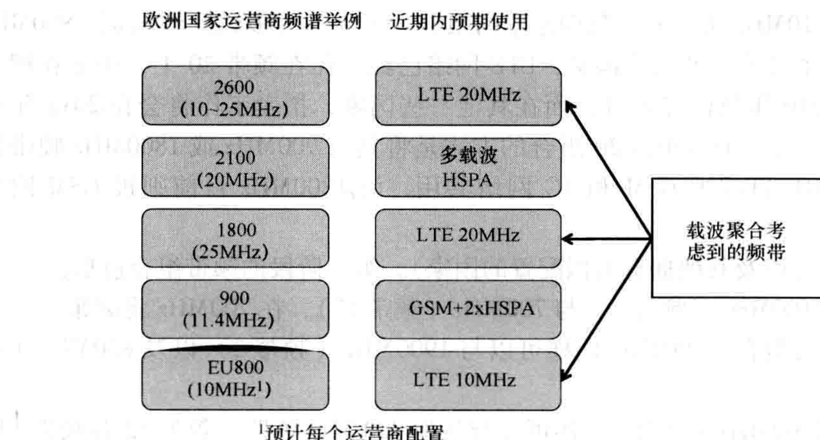


图 4.21　欧洲国家运营商频带配置举例

对于欧洲国家的配置，现在的工作主要集中在以下 2 个频带组合方面：

① 1800MHz（频带 3）与 2600MHz（频带 7）相结合。每个运营商在 2600MHz 通常拥有 10～20MHz 甚至更多的带宽。1800MHz 频带（目前主要用于 GSM）被认为是 LTE 频带重整的一个合适的候选频带，它可以与 2600MHz 频带进行组合，在欧洲国家进行广泛的应用。在图 4.22 所示的例子中，PCell 工作在频带 3，而频带 7 只有下行链路被 SCell 使用。也可以用其他方式进行设置，如 PCell（上行链路和下行链路）工作在频带 7。首先介绍这种频带组合方式是因为在很多欧洲国家频带

7 的牌照已经发放了，而且在这个频带上已经有一些 LTE 网络正在运行了。

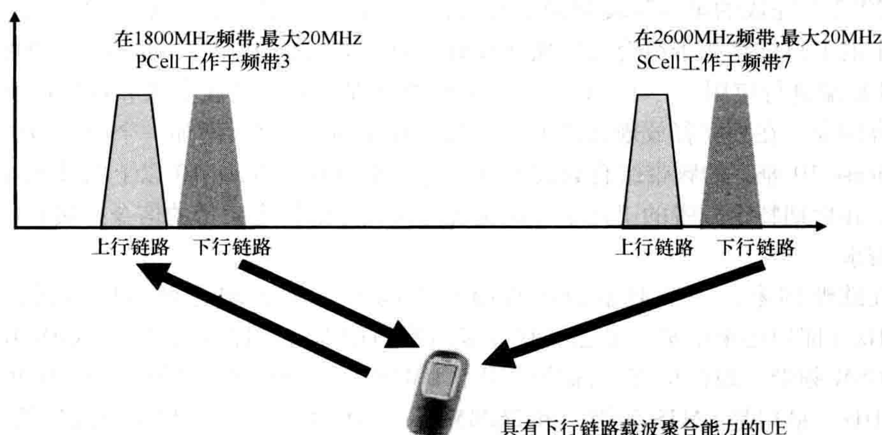


图 4.22 频带 3 和频带 7 的下行链路载波聚合

② 800MHz（频带 20）与 2600MHz（频带 7）相结合，解决了由于每个运营商预期只能得到 10MHz 带宽而对数据速率的限制。因为在大多数欧洲国家，800MHz 牌照已经发放了（在一些欧洲国家，LTE 网络已经工作在频带 20 上，例如在德国频带拍卖在 2010 年就已经展开，而在其他一些国家，拍卖工作将会在 2012 年和 2013 年展开）。另一个与频带 20 组合的方式是将其与 900MHz 或 1800MHz 频带进行组合。900MHz 目前被 GSM 和 3G 网络共用，而 1800MHz 目前则被 GSM 网络占用。

对于美国（以及其他拥有类似配置的国家），第一阶段的频带组合包括：

① 1700/2100MHz（频带 4）与 700MHz（频带 17），在 700MHz 将频带与一个更高频率的频带组合。700MHz 同样可以与 1900MHz（频带 2）以及 850MHz（频带 5）组合。

② 1700/2100MHz（频带 4）还可以与其他 700MHz 频带（频带 12 和频带 13）以及 850MHz（频带 5）和 2600MHz（频带 7）组合。

③ 两个低频带 850MHz 与 700MHz（频带 12）的组合可以解决 LTE 中可用带宽有限造成单一频带不能提供足够高的数据速率的问题（尤其是在重整阶段）。

④ 频带 25（850MHz）同样还可以进行频带内不连续载波聚合，解决了运营商在频带内没有连续的资源配置的问题。

⑤ 对于不配对的频带，2600MHz（频带 41）将会被用来进行频带内载波聚合。

对于其他地区，提出了以下 5 种情况：

① 不配对的 2600MHz（频带 38）进行频带内载波聚合，这是中国的 TDD 可用频带。

② 2100MHz（频带 1，很多国家用于 WCDMA 的频带）与 2600MHz（频带 7）组合。

③ 在韩国可以对 1800MHz 与 850MHz 进行组合。

④ 2600MHz（频带 7）用于带内载波聚合，在单一运营商拥有超过 20MHz 频带的中国和部分欧洲国家是可行的。

⑤ 对于日本，频带 1（2100MHz）可以与频带 18、19 或 21 进行组合，或者将频带 11 与频带 18 进行组合。

在第一阶段，频带组合的工作涵盖了两个下行链路和一个上行链路的情况，一些关键参数如：支持额外频带所带来的插入损耗、参考灵敏度、传输功率损耗以及下行链路中频带组合的其他关键参数一旦在 2012 年首先得到解决后，继而就会解决上行链路的问题。

以上列出的情况涵盖了 3GPP 在 2011 年年底以前所有的频带组合工作。在 2012 年，随着市场需求和兴趣的推动，3GPP 将会提出更深层次的频带组合方案。与此同时，上述情况的性能需求和测试情况将会最终确定下来。

4.7　小结

在本章中，我们介绍了 3GPP Release 10 技术规范规定的 LTE 下行链路载波聚合原理。下行链路载波聚合是一种非常具有吸引力的方法，在没有增加发射和接收天线数量的情况下，与实现 LTE Release 8 相比，它不仅可以提高峰值数据速率还可以提高平均用户容量和小区边缘用户容量。使用单个上行链路载波与两个（或多个）下行链路载波相结合时，只需要在射频路径增加一个额外的转换，就对上行链路预算的影响达到了最小化。实际市场感兴趣的第一阶段的载波聚合（在几个介绍性的场景建立之后，为定义必要的需求的步骤做准备）将会在 2012 年完成，在双天线 MIMO 操作下，下行链路峰值数据速率将可以达到 300Mbit/s。如果有更多的频带和天线，下行链路峰值数据速率的理论值高达 3Gbit/s。在实际的网络部署中，考虑到重大的可实现利益和合理的复杂度，下行链路载波聚合无疑将是最受欢迎的特性。从 LTE 网络运营商对不同频带间的载波聚合的兴趣也可以看到这一点。

参 考 文 献

1. 3GPP Technical Specification TS 36.300 (December 2011) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2, Version 11.0.0.

第 5 章　上行链路载波聚合

Jari Lindholm, Claudio Rosa, Hua Wang and Antti Toskala

5.1　简介

本章介绍了 LTE 上行链路载波聚合的原理。与下行链路载波聚合类似，上行链路载波聚合也是 LTE Release 10 规范的一部分。本章首先介绍了上行链路载波聚合的关键原理；然后详细介绍影响到的协议、过程和物理层。本章还介绍了 LTE Release10 中，引入上行链路多集群调度后，对单载波的资源使用，引起的上行链路物理层的变化。本章最后以上行链路载波聚合性能分析，并总结分析会造成对不同的上行链路频段组合的影响和挑战。

5.2　上行链路载波聚合原理

LTE Release 8 上行链路的最大带宽为 20MHz。如第 3 章中的讨论，UE 以 n 倍的 180kHz 的连续分配资源块来发送。LTE Release10 的上行链路载波聚合的原理是使 UE 在多个不同的上行链路载波上同时发射。如图 5.1 所示为两个 FDD 上行链路载波、单个下行链路单载波的情况。根据频谱分配的不同，上行链路载波聚合可分为如下三类：

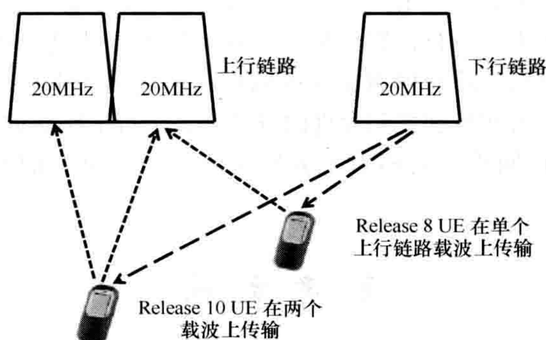


图 5.1　上行链路载波聚合原理

① 发送两个或以上的相邻载波。这种情形一般出现在非成对的频谱分配

(TDD 模式)，通常不可能出现在配对的频谱分配上。特别是在最有可能用于 TDD 的 3.5 GHz 上，有一些运营商具有超过 20MHz 的频带。

② 在同一频带的两个非相邻的载波上发射。与下行链路类似，当运营商在同一个频带内拥有非连续的频谱分配时，被看作是载波聚合的主要场景。

③ 对于上行链路带间载波聚合，传输两个或以上的载波，而这每一个载波都分布在不同的频带上。基于在 3GPP 中所定义的特定频带组合，这被看作是最典型的上行链路载波聚合场景。

与下行链路的载波聚合类似，LTE Release 8 的 UE 可以使用任何载波（但每次只能使用一个载波）；而 LTE Release 10 UE 支持上行链路载波聚合，可以在上行链路载波聚合时使用两个上行链路载波。

在每个独立的上行链路载波上，一个具备 LTE Release 10 载波聚合能力的 UE 以与 LTE 版本 UE 类似的方式进行上行链路数据发送。但是，上行链路的资源使用情况有一定的差异。即使在单个载波的情况下，UE 也不必采用连续的频谱资源分配（在 5.4 节中有更详细的讨论）。另外，PUCCH 只在 PCell 的频率上。

类似于下行链路载波聚合，第一阶段实现的上行链路载波聚合仅限于两个上行链路载波。LTE Release 10 规范支持多达 5 个聚合的上行链路载波，但真正的性能需求研究工作在 2012 ~ 2013 年只达到 2 个上行链路载波。在以后阶段的性能需求中，仍要看是否会将上行链路带间载波聚合扩展到 2 个频带或载波以上。

5.3　上行链路载波聚合对协议的影响

图 5.2 中所示的是上行链路载波聚合后的 MAC 层。资源调度基于在下行链路

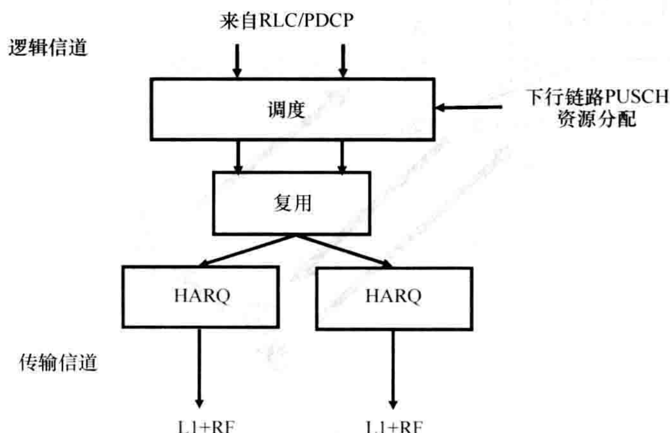


图 5.2　上行链路载波聚合协议链

方向上接收的 PUSCH 资源分配来运行。eNB 的调度器与 LTE Release 8 的定义相同。其根据在每个 UE 上行链路载波上发送的 SRS 及 MAC 层的缓冲器状态报告进行上行链路资源分配的判决。此外，调度器也需要考虑 UE 可用的功率资源，即 UE 是否有足够的发射功率在两个载波上同时传输，或是否应该只在单个载波上传输。

UE 的 MAC 层对于 RLC/ PDCP 层隐藏了载波聚合功能，并分别在上行链路接收器侧 eNB 的 MAC 层将来自相同逻辑信道的 MAC 层的 PDU 进行合并和重组为单个数据流。这些合并和重组及 RLC 层的重传采用 LTE Release 8 协议定义的方式。这方面内容已经在第 3 章进行了说明。

上行链路载波聚合对于 UE 的移动性测量是屏蔽的。如果目标小区支持，上行链路载波聚合可以持续在切换时使用。另外，它可以在越区切换命令中，通过 RRC 重新配置被禁用。

3GPP LTE Release 10 的工作需要确定多个上行链路定时提前量。因此上行链路载波聚合使用两个（或更多）的上行链路是必要的，特别是如果在其中一个频带上使用了特定频带的中继。对于上行链路多个定时提前量的定义未包含在 LTE Release 10 的规范中，但是，其添加到了 LTE Release 11 的规范中。LTE Release 11 的规范中，eNB 可以给 UE 载波（或频带）特定的定时提前值，该值可以支持额外的部署方案，如图 5.3 中所示使用特定频带的中继。在图 5.3 中的场景中，通过使用特定频带的中继，提高了上半段频段的覆盖范围。由于中继在被放大信号的接收和传输之间总是存在一些内部延迟，因此与直接传播信号相比，它需要不同的定时提前值。如果不同的频段由不同（不是位于同一位置）的天线系统服务，有可能还需要其他的用例以及多定时提前值。

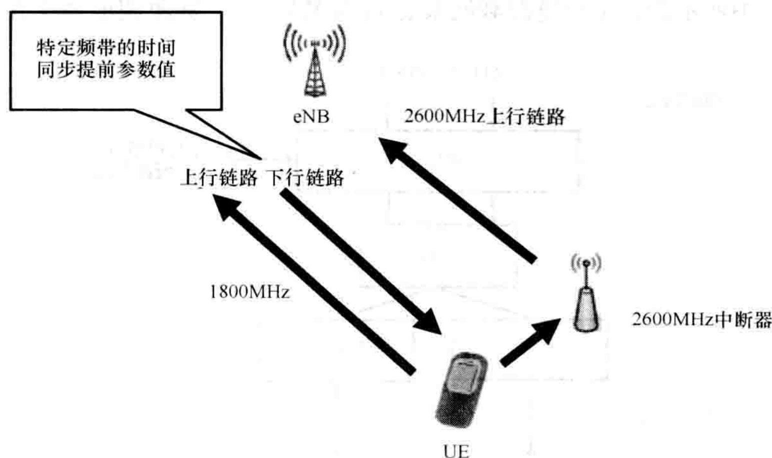


图 5.3　多个上行链路定时提前的用例

5.4　上行链路载波聚合对物理层的影响

PUCCH 经常只在主小区上发送，不管是否存在更多的上行链路分量载波配置在 UE 上。如果在主小区上有调度的上行链路数据，则控制信令与上行链路数据一起在 PUSCH 上传输。这样的方式完全符合 LTE Release 8 的定义内容，具体内容已在第 3 章进行了说明。在 LTE Release 10 中，这种上行链路的新方式（无论是否使用上行链路载波聚合）使同时发送 PUCCH 和 PUSCH 成为可能，而这在 LTE Release 8 和 Release 9 中是不可能的。PUCCH 和 PUSCH 同时发送的原理如图 5.4 所示。

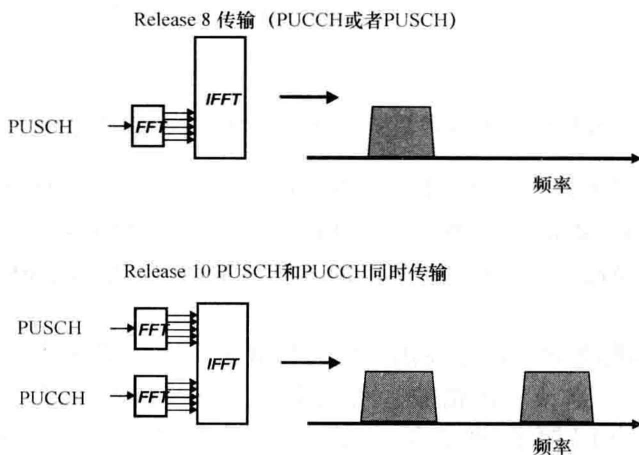


图 5.4　PUCCH 和 PUSCH 同步

PUSCH 和 PUCCH 的同时使用，使得控制信令和数据的功率值可以分开设置，因为数据受物理层重传的保护，而控制信令需要保证一次传输正确。随着 PUSCH 和 PUSCH 的同时传输，使得在上行链路方向上对特定频带的调度有了更多的可能性，而此前只有连续分配的频带被使用。然而，同时传输的控制信令和数据（或两个同时传输的数据资源分配）的使用，会导致在一个单一的上行链路分量载波使用的情况下，在上行链路分配时发生两个并行的 SC-FDMA 传输。这将导致如在图 5.5中所示的载波带外辐射的增加。

图 5.5 中所示的例子只是说明性的（而二者都处于频带边缘时会更极端），但这个研究显示了需要降低最大功率（Maximum Power Reduction，MPR）。由于降低了发射功率，在小区边缘情况下，应避免同时使用 PUSCH 和 PUCCH（或 PUSCH 和 PUSCH）。采用两个并行传输会影响频谱辐射和杂散（OOB 以外）。据详细研

究，并行传输的互调产物会导致辐射的发生。由绝对值看，发射功率需要降低 4 ~ 6dB，在极端的情况下甚至更多。3GPP 计划确定在上行链路载波聚合的情况下，对每个频带或每种频带组合条件下的值。

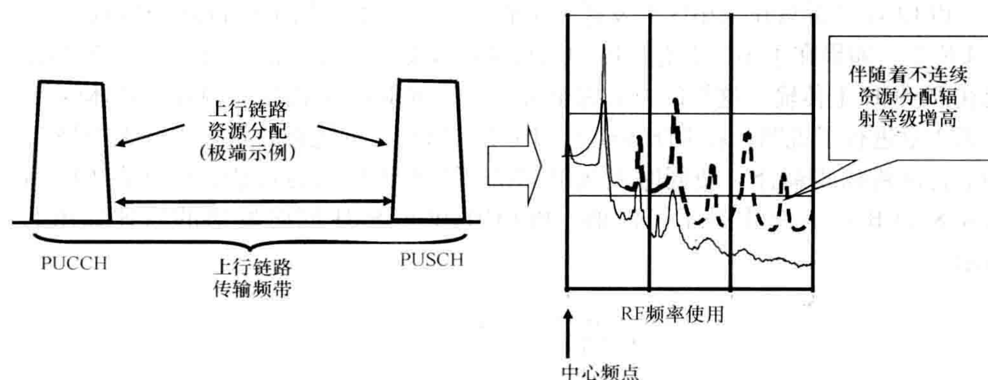


图 5.5　PUSCH 和 PUCCH 的同时使用增加了带外辐射

上行链路的载波聚合传输不会对物理层造成较大影响，特别是在使用一个单一的 PUSCH 时。LTE Release 10 增加了新 PUCCH 格式 3。如第 4 章中的讨论，为了能够覆盖从下行链路的多个载波处得到的 ACK/ NACK 反馈，这种格式能够携带更多位。

另一个具体的考虑是可以使用不同的频带组合。在某些情况下的上行链路的信号的谐波（二次或三次谐波）可能会落入下行链路频带，从而导致接收器侧的问题。有问题的频带组合的一个例子是欧洲国家的 900MHz 和 1800MHz，如图 5.6 所示。如果这两个频带都用于 LTE，由于二次谐波的存在，聚合会遇到困难。900MHz 上行链路二阶谐波干扰 1800MHz 下行链路接收。在许多欧洲国家，由于 900MHz 频带正在或者已经重用到 HSPA（出现并行使用 GSM 和 HSPA 的情况），而不是重用到 LTE，因此，如图 5.6 所示的情况可能不会如此快速地发生。

实际发射的实现总是需要两个基带链。如图 5.7 所示。我们只考虑相邻的上行链路载波时，使用一个单一的功率放大器（Power Amplifier，PA）的单宽带发射机。

当不同的载波使用不同的频带时，更多的分量载波是必要的。图 5.8 所示为包含一个具有两个功率放大器的附加发射器链的 UE 实现在两个含有非相邻载波的上行链路载波上传输（无论是在相同或不同的频带）的例子。由于 UE 发射功率限制，总功率不得超过 23dBm。如前面讨论过的最大功率降低，会导致实际发射功率变小。

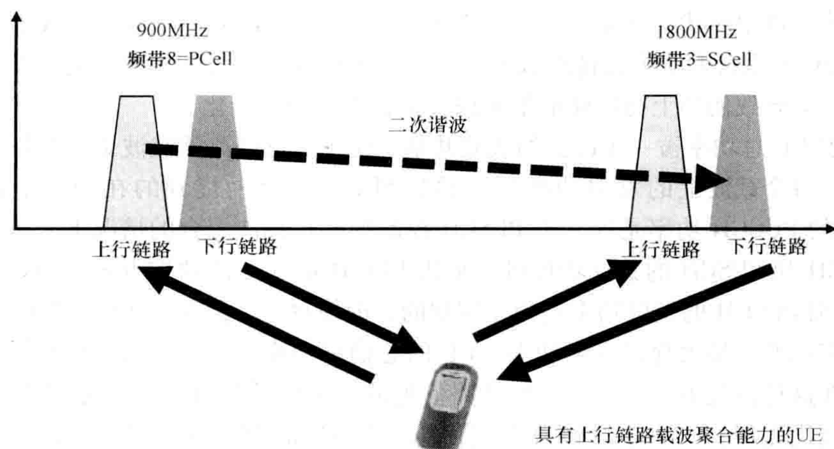


图 5.6　载波聚合时，上行链路对下行链路干扰的例子

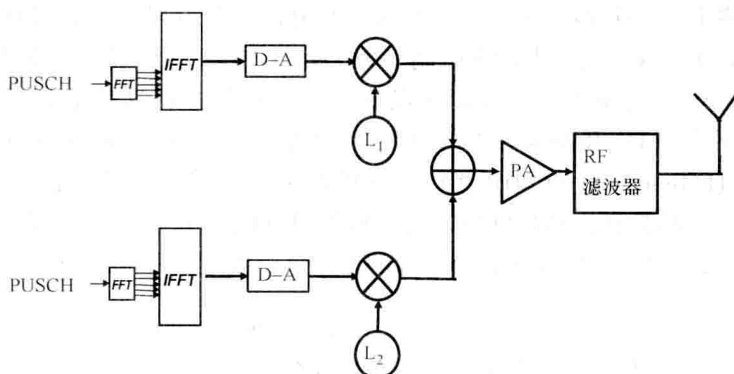


图 5.7　含有单功率放大器的上行链路频带内载波聚合

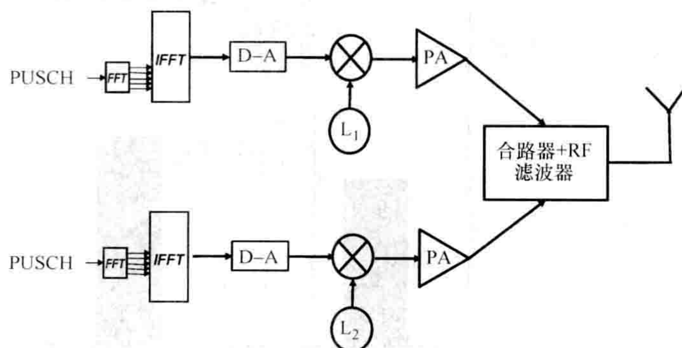


图 5.8　上行链路载波聚合的单发射天线的 UE 发射机结构

如第 7 章中所述，如果还要同时使用上行链路 MIMO，由于在双天线上行链路 MIMO 操作和聚合两个上行链路载波时，每个频率将需要两个功率放大器及相关的过滤器，会导致使用上行链路的带间载波聚合进一步复杂化。

由于 UE 总功率被一个以上的载波共享，使用上行链路的载波聚合也影响了功率控制。每个载波上的发射功率是单独控制的。如之前提到的在同一个载波上 PCell 上的 PUCCH 功率是独立于 PUSCH 控制的。在载波聚合的情况下，每个载波的 PUCCH 和 PUSCH 的独立功控可以重用 LTE Release 8 的功控方案。但是，由于 PUCCH 和 PUSCH 的发射功率是独立控制的，即使每个单独的 PUCCH 或 PUSCH 的发射功率都低于最大允许发射功率，UE 的总输出功率也可能超过 UE 的最大功率限制。在这种情况下，不同的上行链路信道的功率将被缩减，功率分配中 PUCCH 具有最高优先级，具有上行链路控制信息（UCI）的 PUSCH 是第二最高优先级，剩余功率将分配给没有 UCI 的 PUSCH。

正如上文所指出的，如果上行链路资源分配导致杂散辐射较高、发射信号的峰均比过高或者有一些其他的无线电系统同时发射使得总发射功率超过允许的极限，这时可以允许 UE 减少其最大功率限制。为了有效调度，eNB 需要知道其运行是否已接近 UE 的最大功率限制。进而定义功率余量报告并将这些信息提供给基站。图 5.9 所示的是 LTE Release 10 的功率余量报告（Power Headeroom Reporting，PHR）。与 LTE Release 8 的 PHR 相比，在报告中也包括了针对特定载波的最大功率限制。基于这些信息，eNB 可以知道，根据目前的资源分配，UE 需要多少的功率回退。此外，它使 eNB 能够估计运行的 UE 是否接近 UE 特定的最大功率限制，

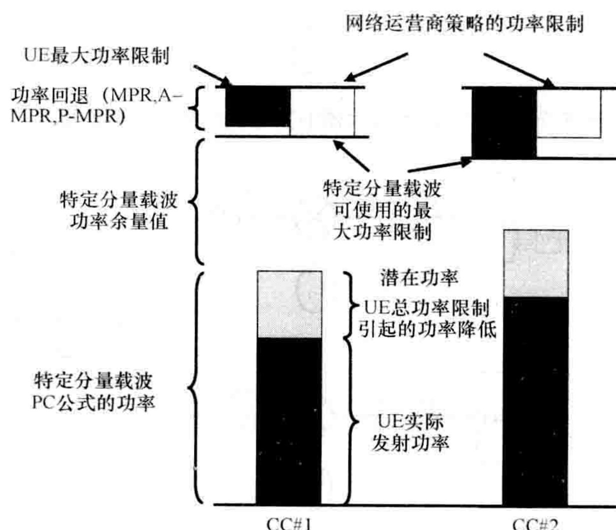


图 5.9　载波聚合情况下 UE 的功率设置和功率余量定义

并进行不会导致 UE 进行功率降低调整。

5.5　性能

在本节中，主要从理论和仿真两方面研究上行链路载波聚合带来的增益。与下行链路方向的增益基本相同，但由于在上行链路方向上受限于发送功率（正在共享），使得载波聚合带来的增益略有差异。如同在参考文献［1］中进行的研究，上行链路载波聚合改进了以下几个方面（与下行链路载波相同）：

① 负载均衡；

② 资源共享；

③ 频域在一个以上频率上联合调度；

④ 对于给定的 UE 提供更多带宽，从而带来更高的峰值数据速率。

在上行链路载波聚合中，负载平衡和资源共享都类似下行链路。eNB 的资源可以用在两个载波上，并且使用载波聚合的 UE 负载可以共享在两个载波的每个子帧（基于 TTI）上。在上行链路中使用的探测信号（SRS）来支持上行链路频域调度，如图 5.10 所示。另外，基于 eNB 中的干扰测量可以完成频域调度。如同在第 3 章中的讨论，早期 LTE 版本中，基站可以在每个载波上配置 SRS 模式。上行链路载波上发送的 SRS 的量决定了每个载波的准确性。

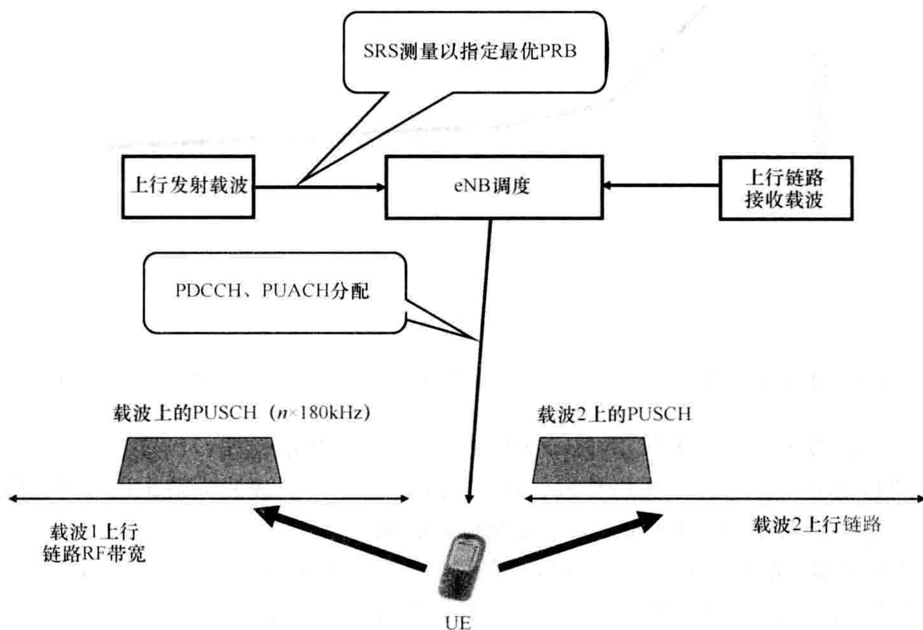


图 5.10　基于 SRS 传输的上行链路频域调度

使用两个20MHz载波，上行链路峰值数据速率从50Mbit/s的（采用16QAM）提高到100Mbit/s；或采用64QAM（单天线传输），从75Mbit/s提高到150Mbit/s。在LTE Release 10以前，在上行链路方向中使用64QAM并不是强制的，这可以从第12章中的UE类型看出。上行链路载波聚合也可以与上行链路MIMO相结合，以达到更高的峰值数据速率，如采用两个20MHz载波、64QAM和上行链路MIMO峰值数据速率可以达到300Mbit/s。

在两个载波上使用频域调度（低中负载的情况下）应该得到与下行链路方向相似的性能增益；但UE的总发射功率是有限制的，于是一般情况下，使用上行链路载波聚合不能使小区边缘用户得到任何增益。即使在多个分量载波上分配，小区边缘用户也不具有足够的功率来利用这些增加的传输带宽。

由于上行链路中的非连续资源分配，在UE功率放大器中增加了所要求的功率回退，从而导致了最大发射功率的降低。准确的功率回退值取决于特定的上行链路资源分配和传输模式及特定的UE实现。因此，最大功率降低在参考文献［2］中标准化，在图5.11中所示的是对UE所需要的功率回退建模。在实际中MPR仅表示功率降低的上限。可以观察到，MPR完全取决于所分配的物理资源块和聚合系统的传输带宽之间的比值。

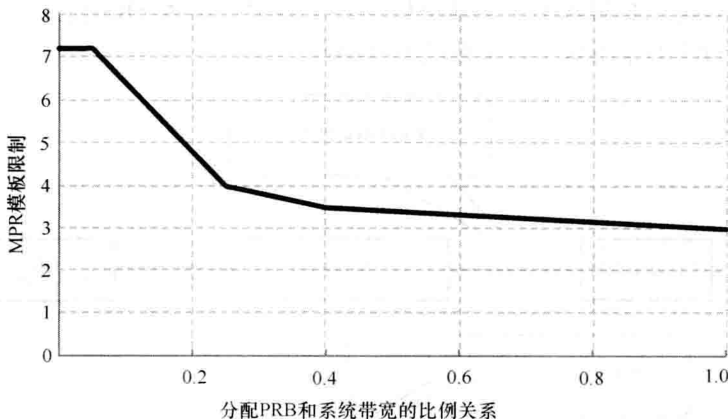


图5.11 标准化的MPR用于对上行链路非连续资源分配的UE所需的功率回退建模[2]

除了载波聚合，在LTE Release 10中也引入了多集群传输，以进一步提高上行链路的频谱效率。通过多集群传输，可以给UE分配一个载波内最多两个不相邻的集群，这样相对于SC-FDMA，可以实现更高的调度灵活性。

在载波聚合的情况下，通过多集群调度，UE还需要额外的功率回退。由于应用在多集群上的标准化[2]的MPR独立于是否在相同的载波中或在不同的（连续的）的载波上，图5.11中的功率回退模型也可以被应用到具有多集群调度的情形下。

在图 5.12 中，研究了针对不同的 UE 数采用 16QAM 时的上行链路的多集群性能。在 10MHz 的情况下，可以看到使用两个 PUSCH 的增益范围在 10% ~15% 之间。随着 UE 的数量增加，增益开始饱和，由于越来越多的 UE 被同时调度，更多 UE 选择多集群操作会导致增益减小。假设有足够的功率资源，UE 无论如何都可以调度在整个带宽上，所以对于单个 UE 情况没有任何好处。

图 5.12 中是多集群情形下的仿真结果，仿真结果规避了其他相关的关键技术，例如多用户 MIMO 等。这些将在第 7 章中进行进一步说明。

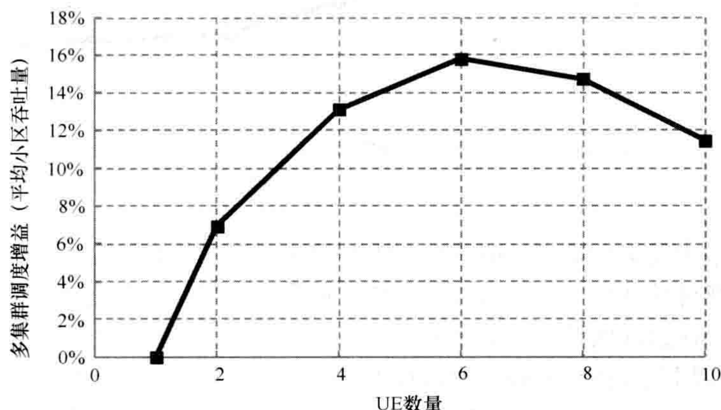


图 5.12　多集群调度增益

接下来，我们来看看与 LTE Release 8 相比的 Release 10 整体上行链路的性能提升（载波聚合，多集群调度）。两个 20MHz 上行链路载波的小区边缘和平均用户吞吐量性能分别呈现在图 5.13 和图 5.14 中，图 5.11 是假设的功率回退模型。

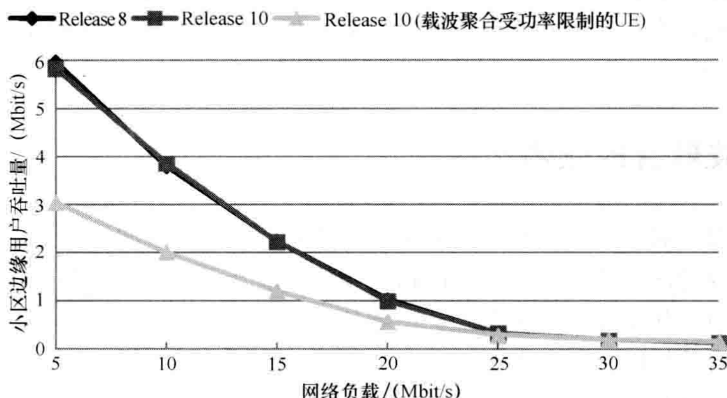


图 5.13　与 LTE 版本 8 的性能相比，采用上行链路载波聚合和双集群调度的小区边缘用户的吞吐量

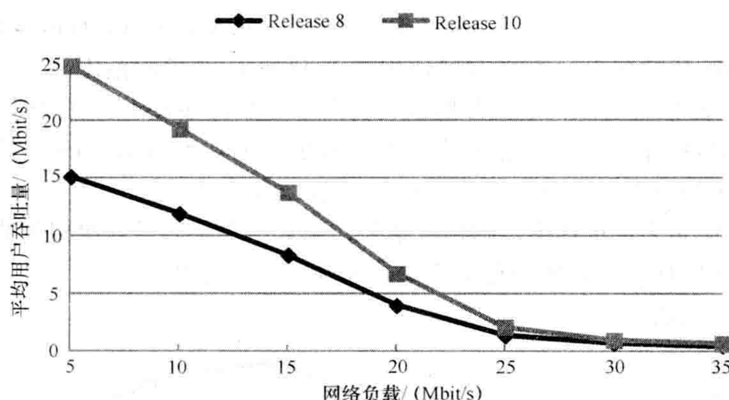


图 5.14　与 Release 8 性能相比的上行链路载波聚合和双簇调度的用户平均吞吐量

对于以最大发射功率发送的受功率限制的小区边缘用户，需要使用载波聚合和多集群调度额外的功率回退，这将导致覆盖损失。从网络的角度来看，这清楚地表明应避免在小区边缘区域使用载波聚合技术。只有当 UE 被识别为非功率受限的情况下，才能使用上行链路的载波聚合技术。在参考文献［3］指出与 Release 8 终端相比，区分 Release 10 终端是否为功率受限来避免降低小区边缘将成为主要的技术问题。Release 10 功率受限终端只分配一个分量载波分配和调度单集群传输。

另一方面，LTE Release 10 终端在未接近最大发送功率时，可以分配两个分量载波。这使它们能受益于载波聚合（和多集群调度）带来的增益。在高负荷的情况下，一个 UE 调度到两个上行链路载波上的概率降低，增益也同样降低。无论如何，与单载波的数据速率相比，较低的负载和足够接近基站的 UE 可以产生两倍的上行链路数据速率，尽管在实践中所观察到在低负载时的增益在 60% ~70% 之间，如图 5.14 所示。

5.6　载波聚合的频带组合

上行链路的载波聚合基本上与第 4 章中的下行链路的载波聚合采用相同的频带组合。但需要考虑到使用两个上行链路会导致的额外干扰，因此部分频带组合的载波聚合可能只能使用在下行链路上。由于比上行链路简单，3GPP 一般先完成下行链路频带组合的性能工作。上行链路会有以下一些额外的问题：

① 由于不希望超过最大发送功率，因此与单载波 UE 发送功率相比，需要对每个上行链路上的功率平均减少 3dB。

② 两个发射器可能会产生额外的问题，影响带外或杂散辐射，从而很可能需

要额外的最大功率降低。

③ 在某些情形下，上行链路发射频带可能太靠近下行接收频带。例如欧洲 1800MHz 和 2100MHz 频带的使用就存在问题。2100MHz 频带的上行链路发射频带边缘 1920MHz 距离 1800MHz 的下行链路频带边缘 1880MHz 只有 40MHz，因此如图 5.15 会导致发射噪声泄漏到下行链路接收频带。目前不建议在这样的频带组合上使用 LTE 载波聚合。在某些频带情形下的谐波可能成为限制使用载波聚合的潜在原因只能在下行链路方向上进行载波聚合。3GPP 已经在某些已知问题的情形下启动了研究工作，这些工作预期在 2013 年中旬左右结束。例如考虑 850MHz 与 1800MHz 频带[4]。

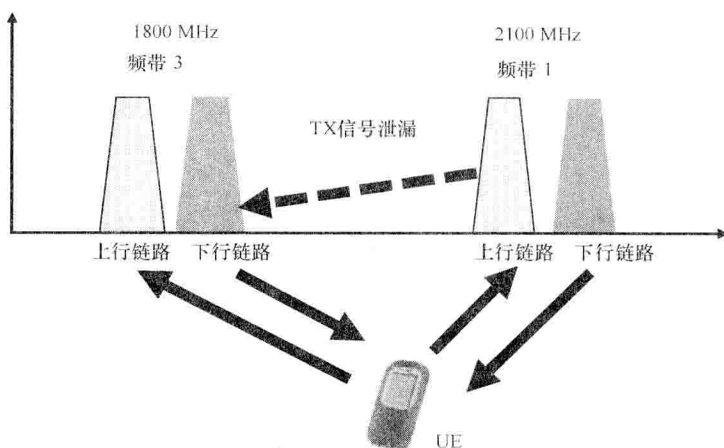


图 5.15　发射功率泄漏至下行链路接收频带

5.7　小结

本章介绍了在 3GPP LTE Release 10 协议中定义的 LTE 上行链路载波聚合原理。上行链路载波聚合的使用允许达到相对于 LTE Release 8 更高的上行链路峰值数据速率。在上行链路单发射天线及不使用 64QAM 调制的情形下可达到 100Mbit/s 的速率。采用 LTE Release 10 的上行链路载波聚合相对于单载波上行链路具有更大的灵活性。Release 10 的协议也支持同时具有两个 PUSCH 资源分配或者同时进行 PUSCH 和 PUCCH 不连续地传输。上行链路载波聚合的标准化在 Release 11 中完成，并将完成多个上行链路时间同步提前值的定义以兼容在特定频带上进行链路中继传输场景。

参考文献

1. Wang, H., Rosa, C. and Pedersen, K. (2010) Performance of uplink carrier aggregation in LTE-advanced systems. Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), in Proceedings, September 2010.
2. 3GPP TS 36.101 (December 2011) UE radio transmission and reception, version 10.5.0.
3. Wang., H., Rosa, C. and Pedersen, K. (2011) Uplink component carrier selection for LTE-advanced systems with carrier aggregation. International Conference on Communications (ICC 2011) Proceedings, May 2011.
4. 3GPP Tdoc RP-120364 (2012) Work Item Proposal: LTE Advanced Carrier Aggregation of Band 3 and Band 5 with 2UL, SK Telecom, 3GPP TSG RAN#55, February 28–March 2.

第 6 章　下行链路 MIMO

Timo Lunttila, Peter Skov and Antti Toskala

6.1　简介

本章介绍了包括 LTE Release 10 规范的 LTE 下行链路 MIMO 增强功能，其作为 LTE-Advanced 工作的一部分，将提高性能并达到 3GPP 对 LTE-Advanced 的要求，以及 ITU-R 对 IMT-Advanced 的要求。首先，给出在 Release 8 和 Release 9 MIMO 功能基础上 MIMO 增强功能的概述。本章主要涉及为保证必要信号的协议方面的变化，然后给出了物理层的影响。本章总结了下行链路 MIMO 性能研究和预期实施的影响。

6.2　下行链路 MIMO 增强概述

在 LTE Release 8 规范中下行链路 MIMO 传输已经可以在 LTE 中使用，并在基于第 3 章所示原则上推出的第一阶段 LTE 网络中得到广泛应用。Release 10 提出了多种新的增强功能，既可以提高性能，又进一步提高在下行链路上可获得的峰值数据速率。以下主要介绍基于 Release 8 和 Release 9 MIMO 功能的新领域，如图 6.1。

LTE Release 8	LTE Release 9	LTE Release 10
基于公共参考信号（CRS）的2×2,4×2和4×4SU–MIMO 基于用户专用解调参考信号(Demodulation Reference Signals,DM-RS)的8TX单流波束赋形 有限制的MU-MIMO	具有波束成形的MIMO传输 灵活的MU–MIMO	支持高达8层(8×8) SU-MIMO 最大8TX的基于信道状态信息参考信号（Channel State Information Reference Symbols,CSI-RS）的预编码矩阵指示(Precoding Matrix Indication,PMI) 单端口CRS操作MU–MIMO增强

图 6.1　在不同版本中的下行链路 MIMO 的发展

① 如果 8 根发射和 8 根接收天线可用（8 × 8MIMO），那么 MIMO 的扩展可支持多达 8 根天线和 8 个并行数据流。

② 利用 2 根、4 根或者 8 根天线发射，在信道状态信息参考信号（Channel State Information Reference Signals，CSI-RS）的基础上得到预编码矩阵指示符。

③ 使用 UE 专用解调信号（UE-specific demodulation Reference Signal，URS）的 MIMO 传输，USR 在与给定用户数据相同的物理资源块上传输。

④ 优化的 MIMO 反馈，包括多用户 MIMO（Multi-user MIMO，MU-MIMO）反馈和单用户 MIMO（single user MIMO，SU-MIMO）反馈。

增强设计的准则是，确保与 Release 8 和 Release 9 的 MIMO 传输的后向兼容性，同时在支持两天线以上 MIMO 传输时降低对系统性能的影响，在 MIMO 使用中有高达 8 个 MIMO 传输数据流时，引入减少额外参考信号开销的解决方案。使用新的结构，对于在 Release 8 和 Release 9 的终端，开销的大小取决于 MIMO 流的数量，从而避免容量和性能下降。

6.3 下行链路 MIMO 增强对协议的影响

下行链路 MIMO 传输只是在物理层可见，然而，MAC 层调度器部分参与决策与上行链路方向接收反馈的连接：当需要调度一个 UE 时、应该使用哪种秩（并行 MIMO 流的数量），或者是当前条件是否适合 MU-MIMO 操作。MAC 层操作与下行 MIMO 的连接如图 6.2 所示。

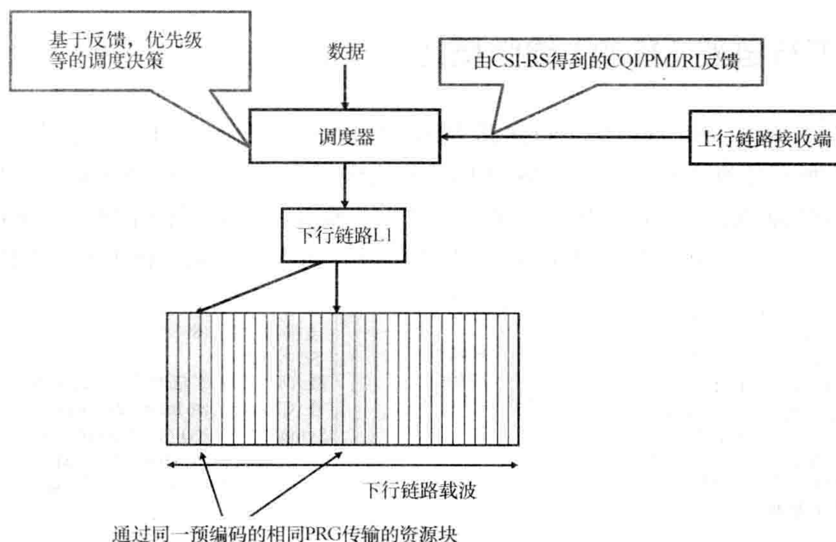


图 6.2　下行链路 MIMO 中 eNB 调度器需要的反馈

UE 从 CSI-RS 得到反馈，这将在 6.4 节展开讨论。然后 eNB 调度器将会根据接收到的反馈，以及 UE 的优先级、缓冲区状态和其他设备商的私有标准，决定调度哪个 UE。如果 Release 10 的多个技术特性可用，如载波聚合，eNB 调度器需要考虑将要调度 UE 多载波上的载波聚合，以及使用哪种 MIMO 传输。

在 Release 10 下行链路 MIMO 传输中，需要给 RRC 信号配置几种新的参数，

包括 CIS-RS 配置和提供哪种反馈。MIMO 的引进对于移动性测量及其实际过程没有改变，因为移动性测量仍然基于 Release 8 CRS 传输。

6.4　下行链路 MIMO 对物理层的影响

增强的下行链路 MIMO 功能主要影响 3GPP 规范中的物理层。引入的 8 个并行流提高了瞬时峰值数据速率，要求用 8 根天线发送和接收这 8 个并行流。显然，由于在 eNB 侧支持 8 根发送天线和在 UE 侧支持 8 根接收天线会带来额外的复杂度，8 个数据流传输预计不会在近期使用。即使使用了多达 8 层传输，传输实际使用的码字数量并没有由两个码字增加，这允许最小化需要的反馈。8 层传输的可能性如图 6.3 所示；在 Release 8 和 Release 9 中定义的 8 种传输模式基础上定义了新传输模式 TM9，其新的参考信号解决方案和改进的反馈形式在第 3 章列出。

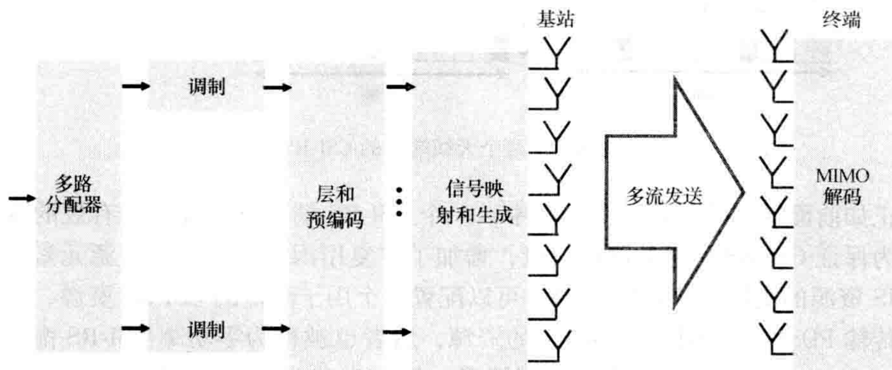


图 6.3　8 根发送 8 根接收的 MIMO 传输结构

CSI-RS 使得终端反馈可以支撑高达 8 根天线的传输，而无需在 4 或 8 根天线时一直发送公共参考信号（Common Reference Signals，CRS）。CRI-RS 用于产生反馈，因此可以用更稀疏的参考信号满足数据监测的需要。因此，当 UE 处于不可能进行高阶 MIMO（超过两个数据流）操作的情况时，相比 4 或 8 根天线发送需要的全 CRS，CSI-RS 只需要产生非常有限的开销。CSI-RS 的密度可变，这是因为 CSI-RS 在时间域可以设置为 5 ~ 80ms 传输一次，并且在每个物理层资源块、每个天线接口只用单一的资源元素。Release 8 或 Release 9 的终端没有利用 CSI-RS 的优势，因此如果它们调度与 CSI-RS 传输在同一个子帧同一时间，那么其性能会受到轻微的影响。然而，这个影响是非常微小的，因为预计 MIMO 增强使用在较小移动性的环境中，发生率是 20ms 发生一次，只有 5% 的子帧因为数据上的额外符号受到轻微的恶化。

一个 CSI-RS 配置示例如图 6.4 所示，传统的 UE 从 2 根天线端口接收数据。使用 4 或 8 根天线时，在将要传输的子帧中，CSI-RS 会占用更多的资源元素。根据使用 TDD 或 FDD、或循环前缀的类别，详细的参数会产生不同的选择。

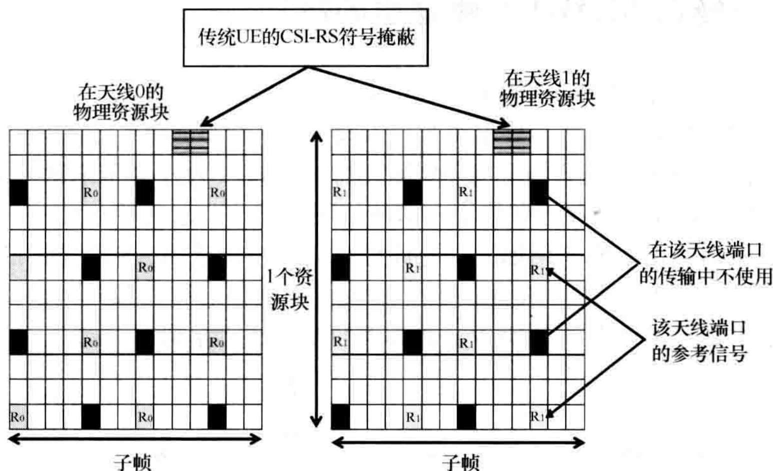


图 6.4 两个天线端口的 CSI-RS

正如前面提到的，在一个子帧中，一个 CSI-RS 端口只分配一个有效的资源元素。为保证 CSI-RS 良好的测量质量，增加了在复用因子超过 1 的资源元素上携带 CSI-RS 资源的支持。这意味着 eNB 可以配置一个用于测量的 CSI-RS 资源，和一组既不传输 PDSCH 也不传输 CSI-RS 的资源，后者也被称为零功率 CSI-RS 配置。这样可以在 CSI-RS 上采用更高的复用因子，例如 3，以提高测量的质量。这可以用于这样一种情况：UE 采用子带测量，子带中只有少数 PRB 中的 RE 可用。引入零功率 CSI-RS 配置的另一个原因是向前兼容未来新版本以支持邻小区 CSI 测量。

当 UE 测量 CQI 时，重要的不仅是判断 UE 自己的信号，还包括来自其他小区的干扰。随着 CSI-RS 的引入，有一些针对是否需要更详细地描述 UE 如何测量干扰的讨论。例如假设 eNB 采用复用因子 1 的 CSI-RS 配置，由于 PDSCH 不会干扰 CSI-RS，那么基于 CSI-RS 的干扰测量将不能区分系统高低负载的情况。为了避免这些问题，仍坚持采取早期版本中基于公共参考信号的干扰测量方法。这里，因为 CRS 位置的频率移位是与小区 ID 硬件连接的，所以总能确保负载感知。

UE 专用参考信号（也是解调参考信号：DM-RS）与数据本身采用相同的预编码和物理资源块进行传输。URS 不使用分配给 Release 8 终端的资源块，因为这些终端取决于公共参考信号的使用，且采用的预编码是独立发信令的。一个带有 URS 的子帧示例如图 6.5，假设这样一个子帧中没有 CSI-RS 传输，本例的 URS 用于 2 根天线、最多 8 个端口的情况下，那么这个 URS 需要用两倍数量（从 3 ~ 8

层）的资源元素。无论如何，相对于 Release 8 中的 CRS，URS 的使用造成了额外的开销，为其他用途保留，包括：尚未分配的传统终端或 Release 10 UE 进行的移动性测量。

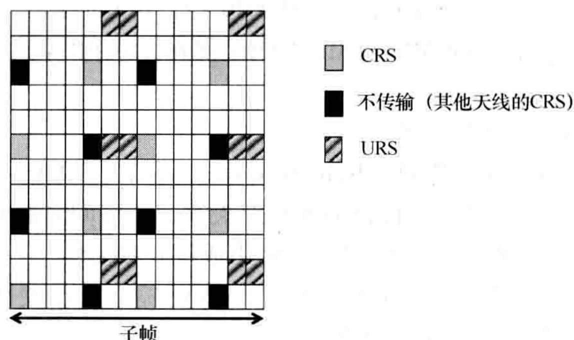


图 6.5　Release 10 每根天线上的 URS，两天线端口示例

下行链路 MIMO 的物理层操作如图 6.6 所示。eNB 低周期性发送 CSI-RS（根据向 UE 信令告知的周期性）。UE 从 CSI-RS 估计得到将会在上行链路方向发送的 CQI/PMI/RI 反馈（周期或者非周期发送 CQI，在第 3 章说明）。eNB 将确定要使用的 MIMO 传输类型。因为 Release 10 的数据和参考信号用同样的预编码和功率发送，基于 Release 8 的 MU-MIMO 模式 5 不需要进一步的功率偏移信号。在参考信号中隐含包括功率偏置信号，允许更灵活的 MU-MIMO 资源分配。从理论上讲，基于 URS 的 MU-MIMO 的配对决策可以在每个 PRB 上独立完成，这允许 eNB 在相同的

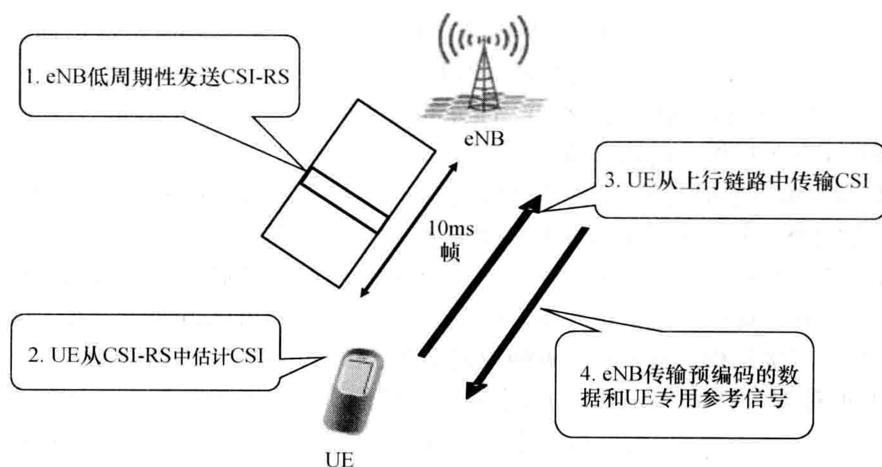


图 6.6　下行链路 MIMO 的物理层操作过程

传输模式下同时实现频率选择性调度增益和 MU-MIMO 增益。在实际中因为分配 URS 端口和序列的灵活性有限，所以在配对上有一定的局限性。

MU-MIMO 操作已经增强，包括更好的反馈操作和与 SU-MIMO 之间的动态切换，并且 MU-MIMO 在 Release 10 中引入到 TM9 中，在 Release 9 中引入到 TM8 中。反馈同时支持下行链路 SU-MIMO 和 MU-MIMO 操作。3GPP 定义的 SU-MIMO 的不同应用如下：

① 紧密排列的交叉极化天线。

② 紧密排列的均匀线性阵列（Uniform Linear Arrays，ULA）类型天线的安装，相比交叉极化天线，特别是交叉极化的宽间距天线，天线间具有较高的相关性。

③ 宽间距较差计划阵列，天线间具有极小或没有相关性。

缺乏相关性的场景适合更高等级的 SU-MIMO 传输，高相关性的场景建议使用 MU-MIMO 传输，将在 6.5 节的性能研究中描述。

在 Release 10 中，对相关码本设计进行了大量的研究。最后达成的共识是，只有以前的版本中不支持的 8TX 码本需要在标准中阐述改变。2TX 和 4TX 码本没有变化，对 Release 8 中 2TX 和 4TX 的整个 UE 反馈方案来说，唯一有变化的是在 TM9 中用 CSI-RS 来测量信道。

8TX 反馈的码本设计基于双码本的原则，这样，它可分为短期反馈和长期的反馈。短期反馈与 SU-MIMO 传输相关，而长期反馈有更多的静态元素，反映了长期的参数，例如传输中的角扩展。3GPP 在 Release 10 中做了如下工作：基于 UE 在空间域上的分离最优化 MU-MIMO 反馈，反映宽带信道的长期相关性，并在每个独立的 CSI 报告间不会快速变化。

双码本结构的操作如下：

① 一个特定子带的预编码器 W 由 W_1 和 W_2 两部分组成，W_1 对应前面提到的长期宽带信道特性，而 W_2 对应于短期频率选择性共相 CSI。

② 反馈速率可以调整，这样 W_1 部分的更新频率较小，预计变化不频繁。W_1 不需要特定子带反馈，而这对 W_2 很重要。

③ 双码本（有时也被称为两阶段码本）的结构已被添加到 8×8 的情况下，双码本原理如图 6.7，UE 可能提供短期 PMI 和 CQI 信息更多的频率反馈。

在 2 根天线和 4 根天线传输模式中，现有 Release 8 的码本仍然有效，因为它们提供一个相当好的性能。进一步，CSI 报告与 Release 8 的原则非常相似，只容纳两个阶段的反馈结构。宽带与子带的周期反馈已被扩展到 8 根天线场景。

UE 的种类可以显示 MIMO 的每个频带的性能，这在考虑到频带不同的性能时尤其重要。在低于 1GHz 的频段，进一步分集天线的好处较少，相对于 2GHz 及以上频段，实现其他天线的优良性能更具挑战性。因此，如果有利于实现的话，UE 可以支持 800MHz 的 2 根天线和 2.6GHz 的 4 根天线。

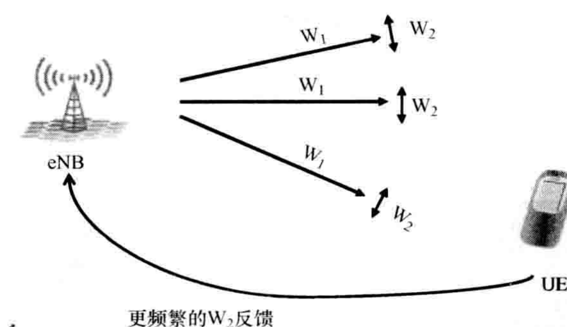


图 6.7　TM9 双码本结构

6.5　性能

这一部分从理论和仿真两方面研究了下行链路 MIMO 聚合的好处，以下方面有所提高：

① 更高的峰值数据速率；

② 性能改进。

更高的峰值数据显然可以在增加的并行传输流数量达到 8 个时实现，在一个 20MHz 的载波时，峰值数据速率将会从 2×2 MIMO 的 150Mbit/s 一直增加到 8×8 MIMO的 600Mbit/s，尽管在 4×4 MIMO 时数据速率是 300Mbit/s。使用 8×8 MIMO和高达 5 个载波将允许理论数据速率高达 3Gbit/s。

- 需要强调 LTE-Advanced 中下行链路 MIMO 的两个特性，它们提供了能力增强：

① 增强了对 MU-MIMO 传输的支持。

② 8 根发送天线的 UE 反馈。

通过使用 UE 特定的参考信号获得 MU-MIMO 增强的支持，这样允许 UE 之间分配 PRB 充分的灵活性，从而允许优化预编码，可能可以减少协作 UE 之间的干扰。性能改善最明显的是 eNB 侧的同极化天线，在最佳 Release 8 传输方案中 4 根发送天线下可以获得重大增益，如图 6.8 所示。

由于正交极化天线减小了尺寸，MU-MIMO 中获得的性能增益减少，所以在这个领域常被使用。主要原因是当多用户干扰得到抑制时，MU-MIMO 才提供增益。这种情况最好是发生在同极化天线时，因为天线之间的相关性仍然很高，并允许强大的窄波束成形达到目标 UE，而对其他 UE 只产生有限的干扰。随着正交极化天线相关性下降，波束成形能力下降。在理论上仍有可能抑制多用户干扰，但它效率低且对信道状态信息的不准确更敏感。图 6.9 是 Release 10 中采用正交极化天线的

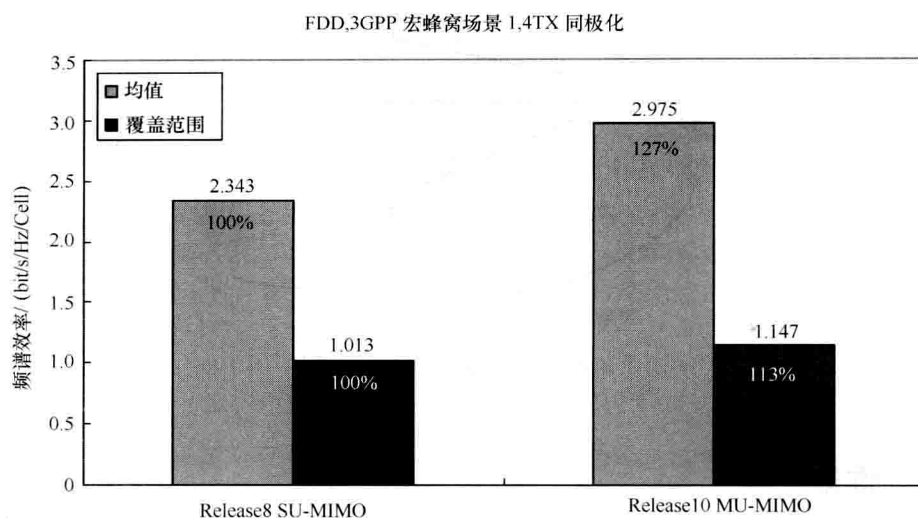


图 6.8　Release 10 4 根天线 MU-MIMO 的性能增强，假设 eNB 侧为同极化天线

MU-MIMO 性能，从图中可以看出，只有支持 8 根发送天线时，MU-MIMO 的性能增益才是可见的。对于一个 8 根发送天线的多用户干扰可以适当减小，因为在两个极化组每极有 4 根发送天线可允许有效的波束成形。

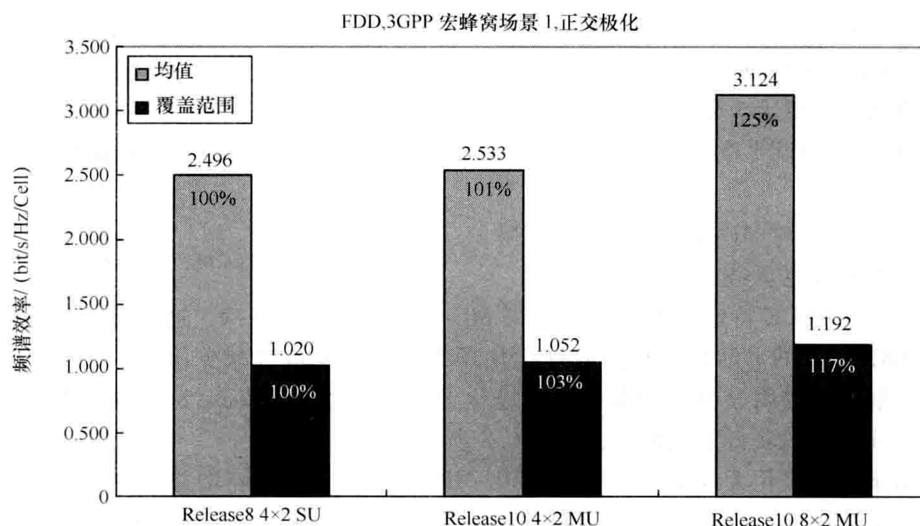


图 6.9　Release 10 MU-MIMO 的性能增强，假设 eNB 侧为正交极化天线

接下来是 MU-MIMO 传输，Release 10 提供了一个新码本，以支持基于 UE 反馈的 8 根发射天线传输。这种传输模式已在图 6.9 的 8TX MU-MIMO 使用，在图

6.10 中，说明了 SU-MIMO 和 MU-MIMO 从 8TX 码本中得到的增益。从图中我们观察到，8TX SU-MIMO 提高了平均频谱效率，但以损失部分覆盖频谱效率为代价，这表明 8TX SU-MIMO 的总增益是有限的，并且来自于 8TX 的增益很重要的是，也要包括对 MU-MIMO 的支持。基本上 4TX SU-MIMO 的 SINR 已经相当高了，因此增加 SINR 和进一步增强的阵列增益不能带来可观的收益，然而，如果结合额外的空间复用 MU-MIMO，可以得到性能增益。

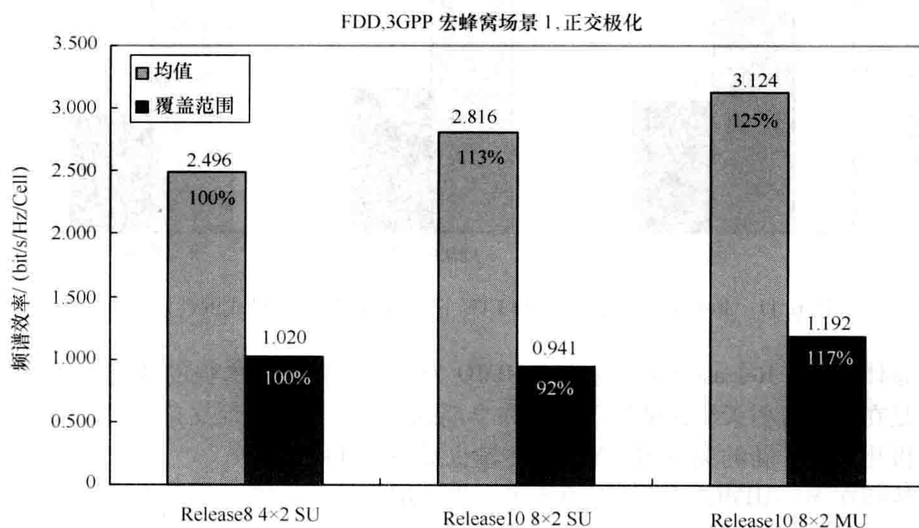


图 6.10　Release 10 8TX 码本的性能增益

对于 TDD 系统，因为上行链路和下行链路信道的互易性（见参考文献［1］），下行链路 MIMO 技术的性能一直被强调为 TDD 优于 FDD 的一个好处。对于 R10 8TX TD-LTE 系统，eNB 有多种选项获取空间信道状态信息。一个是基于 TDD 信道互易性和上行链路的探测参考信号，另一种是基于用户反馈和新设计的 8TX 码本。对于上行链路探测的解决方案，重要的是要知道是什么类型的探测，特别是 UE 是否支持从两个天线发射探测对最终性能很重要。在图 6.11 中，我们展示了三种不同传输模式的性能比较，首先是基于 PMI 的使用非周期的 PUSCH 反馈模式3-2，另外两个使用上行链路探测。上行链路探测我们考虑一种支持天线切换（理想的）的情况和一个不支持（真实的）的情况，从图 6.11 中的结果我们可以看到，理想探测的 TDD 下行链路 MIMO 比 PMI 的性能稍好，然而，对于实际情况下 UE 天线切换是不可能的，相对于 PMI 的性能有不可忽视的损失。总之，TDD 信道互易性，在适当的情况下，相对于基于 PMI 的反馈提供一些好处，但基于 PMI 的解决方案提供了一个可行的替代方案，它不需要 UE 支持发射天线切换，从而也降低了探测的上行链路开销。

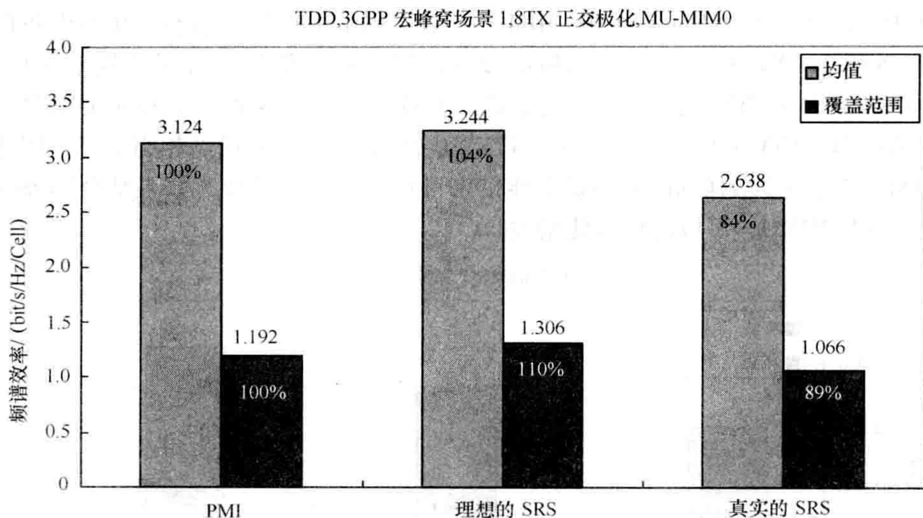


图 6.11　Release 10 支持的 TD-LTE 下的不同 UE 反馈模式的性能比较

整体而言，Release 10 下行链路 MIMO 为许多配置提供增强的性能，最明显的好处是在 8 根发射天线的情况下，这在早期版本中不能很好地支持，但是对于 4 根正交极化天线，新的灵活 MU-MIMO 传输也提高了性能。

然而在 MU-MIMO 下的情况改变了，当采用非相关天线时，不能得到太多的增益，对 Release 8 MU-MIMO 已经进行了研究，结果报告在参考文献［2］中。

6.6 小结

在本章中，我们已经介绍了在 3GPP Release 10 规范中定义的 LTE 下行链路 MIMO 增强原理以及由此产生的性能。3GPP 在 Release 11 中做了进一步的研究，看是否会有一些额外的改进以提供足够的容量增益去平衡为支持它们而额外增加的复杂性时，如第 12 章中所讨论的。下行链路 MIMO 已经在该领域广泛使用，因此 Release 8 性能的经验非常好地展示了 MIMO 在实际网络中的使用情况。理论峰值数据速率和 8 根天线的 MIMO 解决方案和一个 20MHz 的载波甚至可以达到 600Mbit/s。性能的提高依赖于 Release 10 解决方案的部署场景，然而，这很大程度上取决于网络侧使用的天线类型，有利于 Release 9 SU-MIMO 解决方案的同样的情况，并且在某些情况下，在 Release 10 MU-MIMO 传输中展示出更多有利的结果，广泛使用的 X-偏振天线结构有利于 SU-MIMO 的使用。

参考文献

1. Holma, H. and Toskala, A. (2011) *LTE for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
2. Duplicity, J. *et al.* (2012) MU-MIMO in LTE systems. *Eurasship Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011: 496763.

第7章　上行链路 MIMO

Timo Lunttila, Kari Hooli, Yu Yu Yan and Antti Toskala

7.1　简介

本章介绍了 Release 10 协议中 LTE 系统上行链路 MIMO 技术，通过使用多流、MIMO 的上行链路传输，满足 IMT-Advanced 和 LTE-Advanced 的性能需求。本章首先概述了上行链路 MIMO 技术从 Release 8 的虚拟 MIMO 技术到 Release 10 的 MIMO 技术方案的演进发展，阐述相关协议的一些变化和对物理层的影响，以及实现上行链路多址接入的设计方案。最后，本章还对上行链路 MIMO 性能进行评估。

7.2　上行链路 MIMO 增强概述

相对于 LTE Release 8 的下行链路 MIMO 技术，在 Release 8 或 Release 9 的协议中并没有对上行链路 MIMO 技术进行标准化。早期的 LTE 上行链路 MIMO 技术研究是考虑进行标准化工作的，但是经过讨论后，最终决定 Release 8 的标准化工作聚焦在下行链路 MIMO 技术的解决方案上。在上行链路方面，Release 8 时期讨论的备选技术为虚拟 MIMO 或者上行链路多用户 MIMO，此项技术是通过给两个 UE 分配相同物理资源块并且使用彼此正交的参考信号（Reference Signal，RS）序列传输信息实现的。此外，在 Release 8 的协议也包含了天线选择发射分集技术，作为一种可选技术进行讨论。目前 Release 10 版本的讨论提供了很多额外的功能，既要求增加更大的灵活性，又需要兼容支持原先定义的 MU-MIMO 的操作，以及考虑在上行链路引入单用户 MIMO。在 Release 8 的协议中针对 MIMO 容量引入的重点研究领域如图 7.1 所示。

① 引入 2 根天线和 4 根天线上行链路 SU-MIMO 传输，其大体原则与下行链路 MIMO 操作类似，2 根天线操作具体说明见图 7.2。

② 对于虚拟 MIMO（MU-MIMO）的 UE，更灵活的参考信号序列分配将带来更灵活的配对机制。

③ 必要的下行链路信令帮助 UE 传输的 eNB 预编码的选择。

上行链路采用 MIMO 传输可以提高上行链路单载波的峰值数据速率，并且



图 7.1　LTE 上行链路 MIMO 在不同版本协议的演进进展

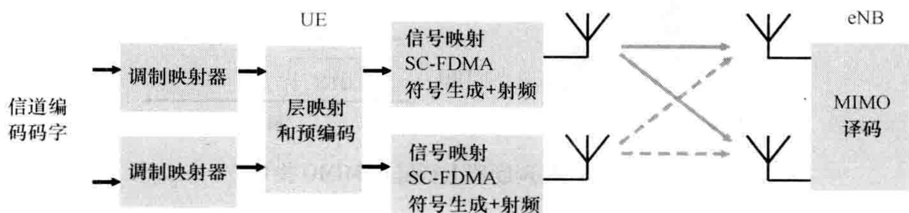


图 7.2　上行链路 MIMO 原理

向后兼容支持 Release 8 和 Release 9 版本协议的单天线 UE 用于上行链路 MU-MIMO 操作。

7.3　上行链路 MIMO 对协议的影响

与下行链路 MIMO 相似，上行链路 MIMO 对协议的影响最大的是物理层。然而，上行链路 MIMO 同样对高层的协议也存在一定的影响。在进行调度决策时，eNB 的上行链路 MAC 层调度器需要考虑 UE 的 MIMO 能力。同样地，如果上行链路需要采用虚拟 MIMO（MU-MIMO）的方式，调度器需要考虑 UE 配对的问题。由于 LTE 采用更灵活的参考信号分配机制，相对于 Release 8，目前这种 UE 配对的条件可以更宽松，使得不同的 UE 可以在频域上部分复用，这部分的内容将在 7.4 节详细阐述。图 7.3 是上行链路 MIMO 的 MAC 层操作的详细说明。

RRC 信令用于设置上行链路 MIMO 相关的参数。在 Release 10 中，MIMO 技术仅用于 PUSCH、PUCCH 以及 SRS。RRC 信令同样用于上行参考信号的增强，具体内容见 7.4 节详述。同时，RRC 信令也用于周期和非周期性的 SRS。

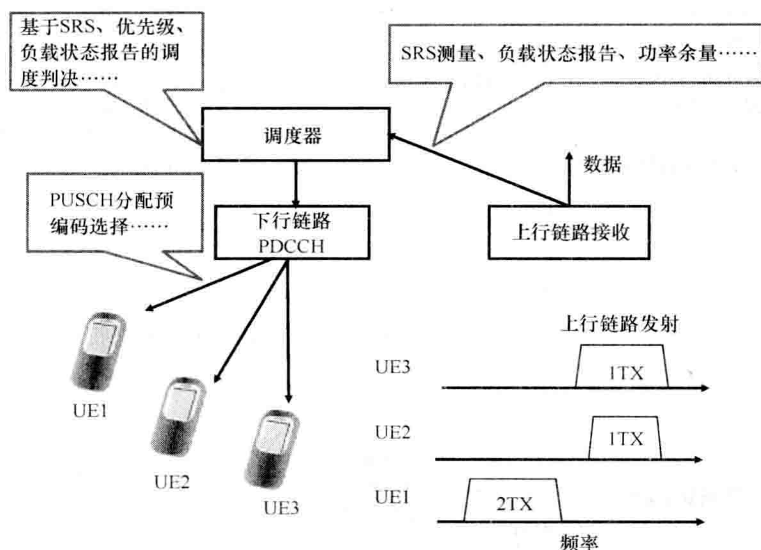


图 7.3 eNB 调度器上行链接 MIMO 操作

7.4 上行链路 MIMO 对物理层的影响

从单天线传输演进到 2 根天线或者 4 根天线传输，这需要在物理层增加部分新的结构。同样，这需要考虑到 MIMO 对信号波形的影响。另外，需要对参考信号的结构进行修正以满足 MIMO 的传输模式，以及更好地利用 MU-MIMO 功能。

7.4.1 上行链路参考信号结构

上行链路上引入了两种额外参考信号的方案：

① 使用正交掩码（Orthogonal Cover Codes，OCC）补充解调参考信号(DM RS)序列的循环移位；

② 利用非周期性 SRS 提高空闲 SRS 资源利用率。

这两种方案不仅对进行 SU-MIMO 操作的 UE 有好处，也有利于单天线的 UE。

正交掩码是长度为 2 的 Walsh 码扩展到 1 个子帧中的 2 个 DM RS 上，如图 7.4 所示。OCC 方式有两个好处：首先，提高了彼此分离的不同 RS 的可靠性，尤其是 SU-MIMO 或者 MU-MIMO 包含多个传输层的情况。另外，2 个 DM RS 在频域上仅有很小的一部分重叠，大部分频域是彼此完全隔离的。这与 DM RS 被循环前缀隔开的情况是不同的。由于目前给 2 个配对 UE 的 PRB 分配不需要完全一致，所以这种 DM RS 在频域上完全隔离的特性对进行 MU-MIMO 操作非常有利。在使用 OCC

时，eNB 需要向 UE 发送循环移位和正交掩码。此外，当 SU-MIMO 模式包含多个传输层时，那么每个传输层都需要一个单独的 DM RS。eNB 可以在上行链路相关的 DCI 格式中指示 8 个不同循环移位集合以及含有 3bit 的 OCC 组合。一组设计的循环移位和 OCC 组合在多个传输层之间可以提供足够的 DM RS 隔离空间。UE 仅使用一组循环移位和 OCC 组合中与传输层数量对应的部分。最后，OCC 不能同跳频序列同时使用，这会由 LTE Release 10 的 UE 专用高层信令禁用。

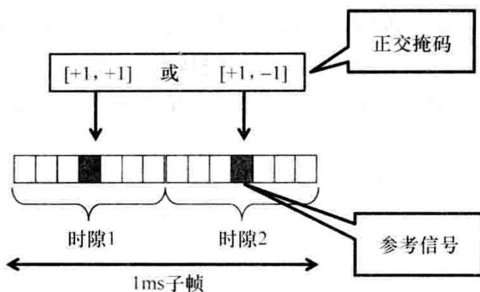


图 7.4 上行链路参考信号中 OCC 的使用

DM RS 使用与链路上行数据相同的预编码，而 SRS 传输不使用预编码技术。也就是说，预编码器的选择是基于 SRS 传输的，因此，上行链路 MIMO 操作将会增加 SRS 的使用数量。在 Release 8 和 Release 9 中，SRS 是通过 RRC 信令进行设置的，并且周期性发送，而不需要进行实时的信道探测。为了提高 SRS 的资源利用率，在 Release 10 中引入了非周期的 SRS。非周期的 SRS 同样也是根据 RRC 信令进行设置，而实际 SRS 传输则是由 PDCCH 指示触发的。目前 eNB 可以更加动态地控制 SRS 传输。SRS 传输主要集中在 UE 有指示传输需求（调度请求）或者基于 MAC 层 buffer 状态报告已知 UE 有大量数据（见第 3 章所述）这两种情况。非周期性的 SRS 请求是通过 DCI 格式 0，1A，4，在 TDD 情况下，也可以由 2B，2C 指示。换句话说，非周期性 SRS 可以通过下行链路分配和上行链路授权触发。为了得到更加灵活的非周期 SRS 的使用，UE 可以使用多个非周期 SRS。非周期 SRS 有 3 个不同的配置，在 DCI 格式 4 的情况下，选择 2bit 的配置。频域隔离的 SRS 同样是通过 1bit 的 DCI 格式 0 和 DCI 格式 1A/2B/2C 的非周期 SRS 请求分配。多个非周期 SRS 的配置主要用于简化非周期 SRS 与其他 UE 的复用，或者支持非周期探测，得到不同的探测带宽、天线端口数量等参数。

在 MIMO SRS 配置的情况下，不同的天线端口发送的 SRS 是同步的，并且由不同的循环移位和传输梳分隔多个 SRS。

7.4.2 上行链路数据 MIMO 传输

上行链路 2 根天线或 4 根天线 SU-MIMO 的引入可以提升上行链路性能以满足 LTE-Advanced 的需求。采用的方式主要是基于宽带（即非频率选择信道）闭环预编码。之所以采用这种宽带方案，是因为频率选择预编码器的反馈不会带来额外的好处，并且还增加了系统开销和设计复杂度。此外，在讨论过程中，认为开环方案作为另一种备选方案并没有带来实质的好处，而相较之下闭环方案的性能要优于开

环方案，如参考文献［1］中示出。闭环上行链接 MIMO 操作中，eNB 对接收到的 SRS 进行估计（非预编码操作）然后发信令告知 UE 其用于上行链路 PUSCH 传输的预编码。这个信令属于 PDCCH 上行链路授权信令的一部分，如图 7.5 所示。

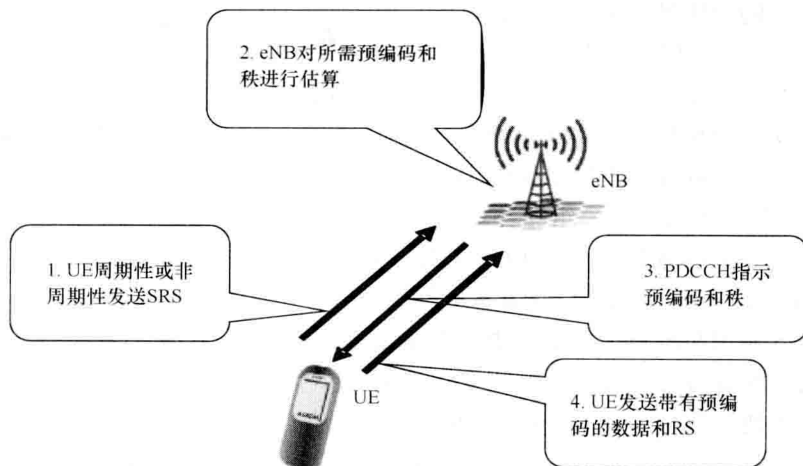


图 7.5　闭环上行链路 MIMO 操作

LTE Release 10 为 PUSCH 定义了 2 种传输模式。TM1 使用单天线端口（Single Antenna Port，SAP）传输，与 DCI 格式 0 上行链路授权一起调度。这种传输模式可用于 SU-MIMO 的 UE 以及仅带有单天线的 UE。一般来说，TM1 同样作为默认传输模式用于例如随机接入过程。在单天线端口传输过程中，eNB 在接收 PUSCH 信号时需要了解上行链路发送时单天线。实际的部署主要取决于 UE 制造商；UE 可以选择仅单天线进行发送，或者选择在所有天线上发送相同数据和固定的预编码。

上行链路 SU-MIMO 中引入了传输模式 2（TM2）。在 UE 上行链路调度时，TM2 可以使 eNB 动态地选择下面两种传输模式中的一种进行传输：

① 单天线端口传输。在 eNB 不能更新信道信息来确定预编码和传输秩的情况下，可使用 SAP 传输。这主要用于回退传输模式以及半持续调度。

② 闭环空间复用传输。在此情况下，UE 可以在空闲的天线上发送单个传输预编码，或者 2 个传输块进行空间复用。这种传输模式见下面的详述。

在闭环空间复用情况下，UE 每个子帧最多使用 2 个传输块，并在下行链路 PHICH 上携带相应的反馈信息，用以指示出每个传输块是否被正确接收。上行链路 MIMO 传输的调度需要使用最新的 DCI 格式 4 上行链路授权，这包含了以下 3 个支持上行链路 MIMO 的信息：

① 每个传输块的调制和编码模式。

② 包含空间层数和已选预编码的预编码信息。

③ 每个传输块的新数据指示符，分别指示是否为重传。

上行链路码本设计反映了上、下行链路 MIMO 操作的主要区别。与其他上行链路的研究类似，在上行链路 MIMO 情况下，发射波形的低立方度量（Cubic Metric，CM）也起着重要作用。低 CM 值优化了 UE 的功率损耗并允许高效利用所有的功率放大器。由于这样的设计准则，不可能简单地重用下行链路 4 发射机 Householder 码本，所以亟待设计新的码本。这就是上行链路 2 根天线和 4 根天线码本保留立方度量的原因；每个天线端口仅发送一个信号，这保证了每个天线发送的波形保持完全的单载波传输以及有益的低峰均比功率特性。

保留 CM 的设计思路包含了 2 根天线和 4 根天线两种情况，保留了单载波传输的优势。

上行链路码本的其他上行链路专有特性还包含天线选择/关闭元素。在天线发射功率均衡的情况下，随着预编码的发送，一些天线将被关闭，可以达到比如节约 UE 电池消耗的目的。

举例说明，2 根天线单层和 2 层传输的预编码设置如图 7.6 所示。4 根天线上行链路 MIMO 所有可能的预编码设置在参考文献［2］中描述。在多层传输的情况下，保留 CM 的预编码上每列仅有一个非零值。也就是说，每根天线仅用于一层的传输。这也就限制了可用预编码的使用，即对于在 2 根发射天线且秩为 2 的传输，以及对于 4 根发射天线且秩为 4 的传输，仅有一个备选预编码。实际上，标准化的码本包含了更多的码本选择并在传输秩小于使用的天线数时，将预编码发送给 UE。在下行链路方向，在根据信道特性选择合适的预编码后，预编码在接收端协助最大限度提高信噪比（SNR）。

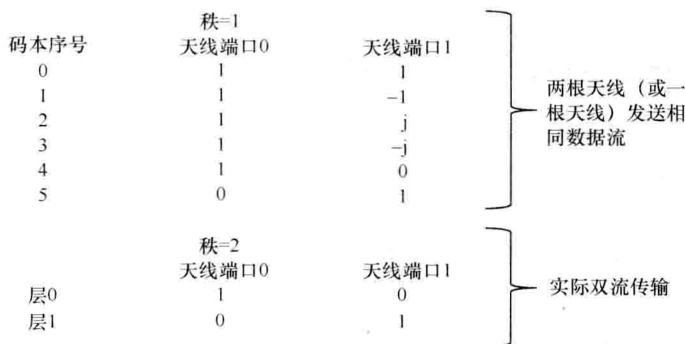


图 7.6　2 根天线情况的上行链路预编码设置

在发射端，来自信道编码器的数据映射到层，以上行链路 2 根天线发射为例，如图 7.7 所示。在 2 根天线情况下，每个传输块映射到一个空间层，而在 4 根天线情况下，根据传输秩，传输块映射到一个或者两个空间层上。每一层只有一个传输

块的传输数据。

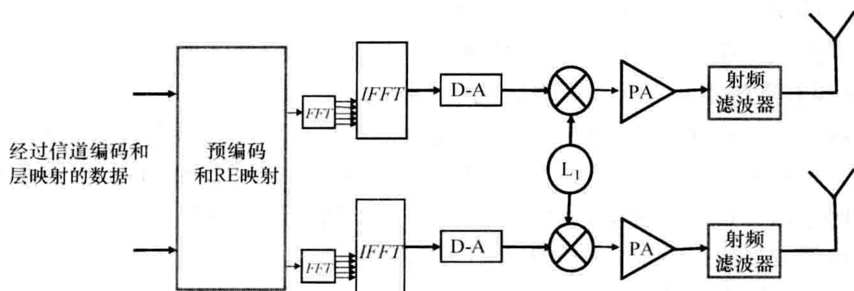


图 7.7　上行链路 MIMO 发射机

OFDMA 作为 LTE-Advanced 研究的一部分，需要研究其是否在上行链路中更适合与 MIMO 技术。然而后续的研究发现，如参考文献［3］所述，SC-FDMA 同样可以达到与 OFDMA 相同的性能。并且在上行链路中使用 OFDMA 还会导致 CM 的增加，如参考文献［4］所述，因此 OFDMA 上行链路多址接入技术并未被采纳入标准中。此外还需要 UE 包含其他发射机类型以及 eNB 包含其他接收机类型以兼容目前已存在的上行链路接入方案（由于依照早期版本，UE 无论如何延续上行链路 SC-FDMA，因此 eNB 必须并行实现一种其他类型的接收机）。

下行链路方向，UE 种类指示了在每个频带上的 MIMO 能力。每 20MHz 的峰值数据速率目前从 50Mbit/s（16QAM）提高到 100Mbit/s（2 根天线情况），若使用 4 根天线且 64QAM 时甚至可以达到 300Mbit/s。UE 的种类将在第 11 章进行详细介绍。

7.4.3　上行链路控制信令的 MIMO 传输

PUCCH 与 PUSCH 类似，不存在闭环信令。因此 UE 需要发送不带任何下行链路反馈的 PUCCH，即不采用闭环方案。所以，在终端存在多根天线用于上行链路 PUCCH 传输的情况，选择这种设计可以使用发射分集得到增益。其原理是根据空间正交资源发射分集（SORTD），SORTD 本质就是正交的 PUCCH 资源分配到所有已用天线端口上（不论 2 根天线或 4 根天线是否空闲，都使用 2 个天线端口），并且每个天线端口发送相同的数据流。SORTD 用于 PUCCH 格式 1/1a/1b，2/2a/2b 和 3。SORTD 将进行全发射分集，从而改进上行链路信令的性能。

在上行链路控制信息在 PUSCH 上复用多个传输层的情况下，那么根据不同类型的控制信息，存在两种不同的传输方案。PDSCH 在所有传输层上复制和发送 HARQ 确认以及下行链路秩指示符。这样做的目的是为了提高至关重要的控制信息的传输可靠性。控制符号在时域上的位置同样与传输层对齐，这样便于使用更前沿

的接收机进行 HARQ-ACK 和 RI 检测。另一方面，典型的较大下行链路信道质量指示和预编码矩阵指示仅在单个传输块对应的一层（或多层）发送。

7.4.4　上行链路多用户 MIMO 传输

LTE Release 8 的多用户 MIMO 操作对于 UE 是完全透明的：eNB 可以在相同资源上简单地调度 2 个 UE 而不需要 UE 知晓此操作。但是，由于不同 UE 上行链路参考信号的正交性，当 2 个 UE 使用相同的资源分配时，可以保证它们共享相同的 PRB。因为从频域调度的角度来看，对于不同的 UE，相同的 PRB 通常并不是最佳的选择，所以这就使得上行链路 MU-MIMO 较为复杂。频域上 PRB 的分配需要考虑 MU-MIMO 配对的问题，因此在 Release 8 上行链路 MU-MIMO 的增益并不是非常显著。

Release 10 的 LTE 协议引入了一个重要的上行链路 MU-MIMO 增强技术。正交掩码使得上行链路 MU-MIMO 的 UE 配对机制比 Release 8 的更加灵活。通过给 MU-MIMO 配对后的 UE 分配不同的 OCC，原本分配完全相同资源的苛刻要求现在放宽了，并且在 UE 可以在最优频率资源上灵活调度，同时 eNB 可以在频域重叠部分分离不同 UE 的传输，如图 7.8 所示。



图 7.8　Release 8 和 Release 10 的上行链路 MU-MIMO 资源分配

7.5　性能

本节主要从理论研究和仿真分析两方面介绍上行链路 MIMO 操作的好处。包括以下几方面的改善：

① 系统带宽为 20MHz、使用 2 根天线模式的情况下，使用 16QAM 调制方式，上行链路峰值数据速率由 50Mbit/s 提升到 100Mbit/s；使用 64QAM 调制方式时，峰值数据速率从 75Mbit/s 提升到 150Mbit/s；在进行 4 流 MIMO 传输模式时，甚至可进一步达到 300Mbit/s。

② 根据所使用的天线数与天线相关特性，上行链路容量相对于单天线传输可提升 40%。

③ 由于 UE 配对灵活性的提高，MU-MIMO 性能也随之得到增强。

MU-MIMO 和 SU-MIMO 提高了上行链路吞吐量，如图 7.9 所示。结果显示了在 eNB 侧配置相同数量的接收天线，上行链路 MIMO 操作和非 MIMO 操作吞吐量的对比。图中显示了应用 Release 10 DM RS 增强的 SU-MIO 和 MU-MIMO 增益。可

以注意到 SU-MIMO 和 MU-MIMO 得到的小区容量增益相差不多。此外，SU-MIMO 预编码很大程度地提高了小区边缘的性能。因此 MIMO 取得的吞吐量增益多少取决于多种因素。例如，eNB 的小区间干扰聚合通常就会降低 MIMO 增益，但是这里暂时不考虑此项影响因素。另一方面，在支持 64QAM 的 UE 数量降低时，小区容量的 MIMO 增益则会增加。

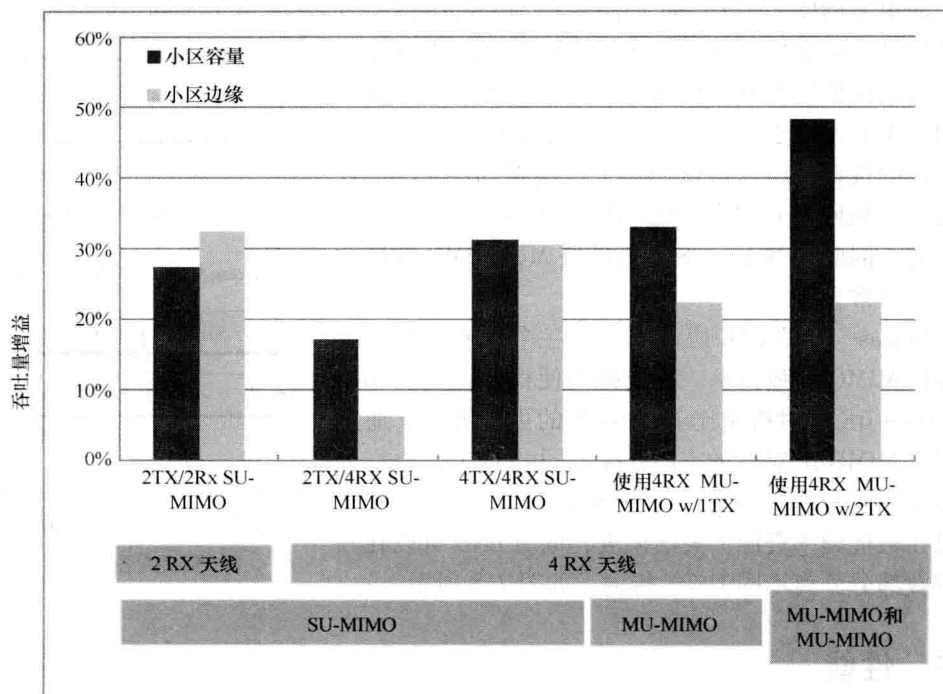


图 7.9　SU-MIMO 和 MU-MIMO 吞吐量增益

由于上行链路 RS 使用 OCC，使得所用的 PRB 不需要完全相同，因此更容易在重叠资源上对 UE 进行调度，使 MU-MIMO 性能得到提高。在图 7.10 中显示了 10MHz 带宽、4 根天线 MMSE 接收机的配置下系统性能的情况。这种系统配置可以提高高达 40% 的系统增益，超过了不使用 MU-MIMO 的单用户情况。UE 数少时，UE 之间配对的可能性也会很小，因此随着增益的提高，UE 数达到了 10 个（可以达到饱和）。这种情况下，调度器有足够的配对资源来对上行链路调度进行选择。

未来可能结合上行链路多簇调度与 MU-MIMO，以进一步提高性能。由此得到调度器的灵活性，从而得到更频繁地应用 MU-MIMO 并且进一步提高 MU-MIMO 的性能。

7.6 小结

本章讨论了在 3GPP Release 10 协议中进行定义的 LTE 上行链路 MIMO 的原理及其性能。上行链路 SU-MIMO 的应用提高了系统的峰值数据速率和性能，然而需要付出的代价则是使用 2 个或者更多个上行链路发射机 RF 链，其中包括了多个功率放大器和 UE 发射天线。通过使用简单的预编码的设计，保留信号波形的特性（CM）从而避免了额外的功率降低。除了上述能力外，20MHz 系统的理论峰值速率将会到达 300Mbit/s。Release 11 中并没有对上行链路 MIMO 增强展开进一步的研究，但作为 CoMP 技术研究的一部分，Release 11 中讨论的上行链路方向的多点接收（以及相关反馈）将在第 13 章展开阐述。

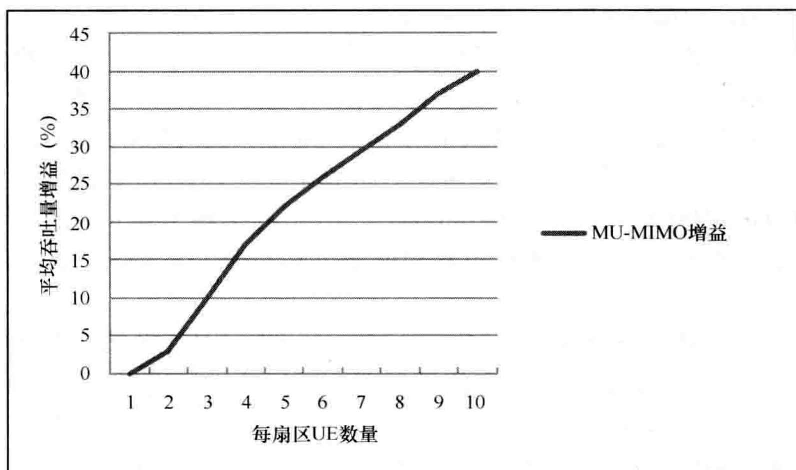


图 7.10　上行链路 MU-MIMO 的增益与每扇区 UE 数量对比

参考文献

1. Lunttila, T., Kiiski, M., Hooli, K. *et al.* (2009) Multi-antenna techniques for LTE-advanced, Proceedings of WPMC 2009, Sendai, Japan.
2. 3GPP Technical Specification, TS 36.211 (December 2011) Physical Channels and Modulation, v 10.4.0.
3. Berardinelli, G., Navarro Manchón, C., Deneire, L. *et al* (2009) Turbo Receivers for Single User MIMO LTE-A Uplink, IEEE.
4. Holma, H. and Toskala, A. (2011) *LTE for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
5. 3GPP Tdoc R1-094651 (November 2009) Performance of uplink MU-MIMO with enhanced demodulation reference signal structure, Nokia Siemens Networks, Nokia.

第8章 异构网络

Harri Holma, Patrick Marsch and Klaus Pedersen

8.1 简介

近年来，移动宽带网络的流量大幅增加，并将继续保持增长势头。然而正如前面章节讨论的，为提升网络容量可以通过传输方案实现更高的频谱效率或者通过使用更多的频谱；而最简单的方法是部署更多的基站。基站越多，单位面积内重复利用无线资源越频繁，单位面积内有效地提高了频谱利用率。当然，移动网络运营商将逐渐在流量需求最高的地方部署更多的基站，并为了最佳的补充现有小区基础设施，以最低的成本选择天线配置和发射功率。这通常导致大基站和新的小基站共存的网络配置。此外，网络的演进将导致不同的无线接入技术（RATs）共存，如GSM，WCDMA/HSPA 和 LTE/LTE-Advanced。一系列多种基站尺寸（所谓的层）和多重的无线接入技术通常被称为异构网络（HetNets），这是本章中要讨论的问题。

Small Cells 的硬件成本低于宏小区，这是它特别吸引人的地方。技术的演进进一步宣告了这种趋势，原因是数字信号处理比射频技术演进得更快，而且 Small Cells 射频电路比宏基站要小。此外，Small Cell 的发射功率远低于宏基站，因此功率放大和降低所需的费用的优势将大大降低。总体而言，能够以低成本建小型基站，有更低的功耗和更小的外形，这使它们的安装和选址更加容易。

显然，与更多不同的基站相连接的异构网络的一个挑战是，它需要更多复杂的网络配置和优化。在这章将看到 LTE-Advanced 也能帮助解决这个问题。其通过自组织网络（SON）功能的可用性和增强型小区间干扰协调算法来实现。

图 8.1 说明了 Small Cell 部署的驱动因素和促进因素。Small Cell 这个研究领域已经讨论了很多年，但是直到现在才开始考虑在移动网络中大规模的 Small Cell 部署。

本章安排如下。首先，8.2 节描述了 3GPP 定义的基站分类。8.3 节对于异构网络的环境下流量控制和移动性管理的问题进行研究，即如何动态地分配设备和服务到正确的层或无线接入技术。8.4 节对如何解决同频干扰的问题介绍了多种方法，这是连接异构部署的主要问题之一。8.5 节对特定异构网络方案探究了更多的细节，如户外 Small Cell 及室内家庭基站，并呈现了之前讨论的移动性和干扰管理

方案的性能结果。8.6节对本章作了总结，并给出参考文献。



图8.1 Small Cell部署的驱动因素和促进因素

8.2 基站分类

到目前为止，大多数基站为广域宏蜂窝小区。其通过使用高位置安装的天线和高功率发射机可覆盖数 km^2 的范围。户外 Small Cell 通常被称为低功率的无线接入节点，通过使用安装的低天线可覆盖几百 m 的范围。室内基站可放置在公共场所，如商场或写字楼，或者家里。公共室内解决方案传统上使用室内天线和射频电缆，连接到位于同一建筑内的宏基站，这种解决方案称为分布式天线系统（Distributed Antenna System，DAS）。分布式天线系统的好处是升级新的无线电设备相对简单，最佳的情况是，只需要插入新的基站板到现有系统，不需要升级电缆或天线。分布式天线系统的缺点是增加更多的天线可能仅仅增加覆盖范围，并且为超出覆盖范围提供更多同类的服务质量，但它不能大幅地增加容量，因为相同的物理层传输资源通过一个较大的覆盖区域简单地共享。如果增加了容量，必须通过小区分裂。这种方式比较复杂且可能需要对电缆做重大的改变。

另一个室内方案是家庭基站，也被称为微微基站。家庭基站主要为了改善覆盖范围和容量在家里和小型办公室部署。不同类型的小区概述如图 8.2 所示。

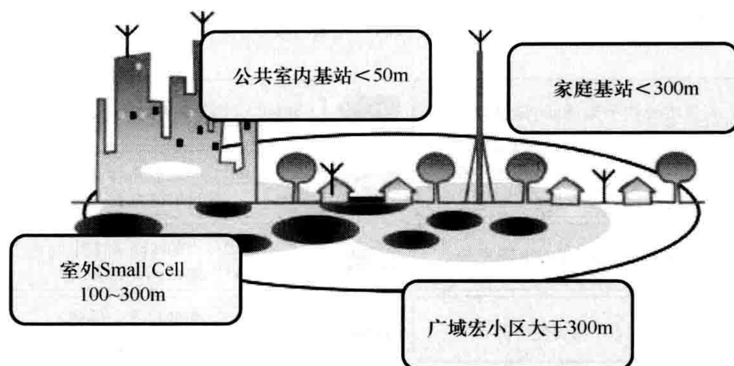


图 8.2 不同类型基站的概述

3GPP 已经分别对广域、中距、局域和家庭基站定义了射频要求。基站根据 UE 可达到天线的接近程度来分类。这是由最小耦合损耗（Minimum Coupling Loss，MCL）来衡量的。对于广域基站，假设 MCL 超过 70dB，实际上指的是一个高位置安装天线，如屋顶，桅杆或杆。中距基站假设 MCL 超过 53dB，局域基站定义为 45dB 的 MCL，这意味着 UE 距离天线的位置较近。一个广域基站的最大功率电平在 3GPP 规范中没有限制。典型的产品有 2×2 MIMO 支持 2×80W 功率电平。此外，宏基站通常使用扇区化，分为 3~6 个扇区，从而推进总站点功率达到 1kW。中距、局域和家庭基站分别限制在 5W，0.25W 和 0.10W。这些功率电平是所有传输支路联合到一起的功率。例如，限制为 0.25W 相当于 2×0.125W 或 4×0.0625W 的 2 根或 4 根天线的情况。在频率稳定性、杂散发射、灵敏度、动态范围和阻塞要求方面也定义了相关的射频要求。Small cell 的射频要求一般比高功率的基站更为宽松，使其更有可能降低射频部分的成本。LTE 基站的分类说明如图 8.3 所示。在这本书的写作过程中中距分类正在 Release11 中讨论，而其他的分类已经包含在 Release 10[1]。

8.3 流量控制和移动性管理

流量控制允许运营商基于 UE 业务及终端类型、基站功率小情况等将流量引导到特定的无线接入技术或层以最优化资源使用。但是，这必须与移动性管理密切关联在一起，确保稳定和最优的移动性能，例如许多合理的切换和无线链路故障的避免和乒乓效应。

特别是在异构网络的环境下，流量控制是降低运营成本（Operation Expenditures，OPEX）主要的驱动者，并且它能够限制或推迟资本支出（Capital Expenditures，CAPEX）。在这方面，常规的策略是转移尽可能多的流量给家庭基站或 WiFi 小区，因为这些通常包含一个廉价的回程基础结构。此外，剩余层和无线接入技术

之间的负载平衡准许更有效地使用基站的基础设施，从而提高投资回报率，并提供更均匀的服务质量。流量控制需要从以下几方面考虑：

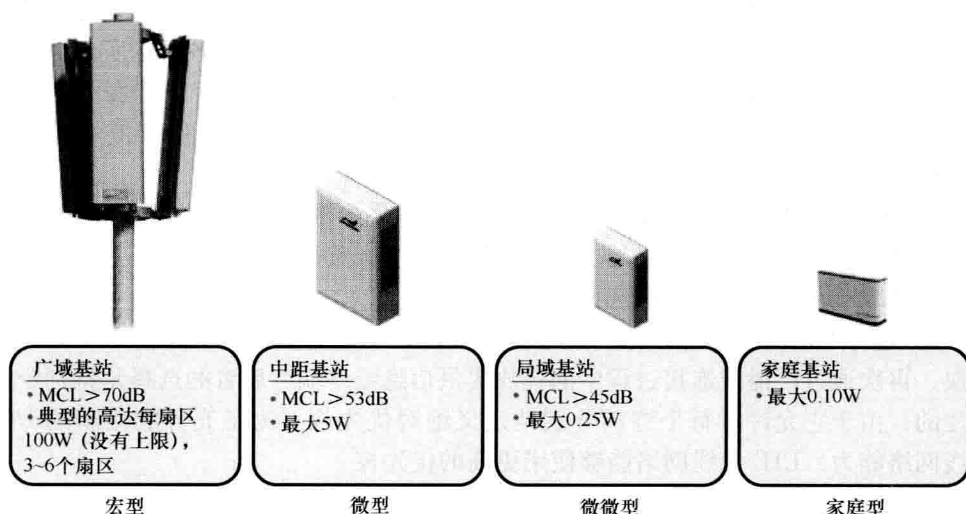


图 8.3　3GPP 基站分类（MCL＝终端和基站天线之间的最小耦合损耗）

① 信号强度和干扰；
② 终端和网络的容量；
③ 请求的服务和服务质量（QoS）；
④ 加载不同的无线接入技术和层；
⑤ 基站和终端的功耗；
⑥ 终端速度。

LTE 和 LTE-Advanced 提供多种的方法完成流量控制，典型地分成适用于终端在空闲或连接状态，如图 8.4 所示。在空闲状态一般是让 UE 驻留在最优的无线接入层，一旦其建立连接即可享受最好的服务，而在连接状态其目的在于完成负载平衡和保证提供无缝服务。

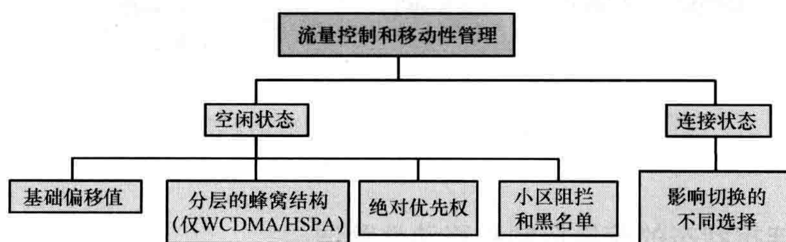


图 8.4　流量控制和移动性管理的不同选择

8.3.1 空闲状态的流量控制和移动性管理

在空闲状态，也就是一个终端不存在到无线网络连接时，终端自身负责测量它的环境和选择无线接入技术或者频谱层。然而，网络能通过提供各种在所谓的系统信息块（System Information Block，SIB）里的参数影响终端的选择，如在小区重选步骤中所涉及的阈值和优先级。LTE中标准化的小区重选机制可用于流量控制目的，在下面的列表中进行详细的解释：

① 基本偏移值：基站可以广播小区选择和排序参数给所有的终端，或连接过程中提供这些信息给特定的终端。这些参数包含小区重选滞后和质量偏差，以有效地扩大或减小小区被特定终端选择的范围。

② 绝对优先权：网络也能对不同的内部或交互无线接入技术载波定义绝对优先权，再次通过广播或连接过程中的释放提供信息给终端。后者的选择是特别令人关注的，由于它允许对每个终端分别地定义绝对优先权。为了充分利用新的LTE无线网络能力，LTE无线网络能够使用更高的优先权。

③ 小区阻拦和黑名单：网络可以阻拦一个小区或提供一个终端不能驻留的小区黑名单。

控制更多的流量转向Small Cell的一个解决方法是使用覆盖范围扩展；也就是，实际上通过增加偏置量来增加Small Cell的覆盖范围。然而这意味着一个终端实际上从附近的宏基站比从Small Cell连接到一个更小的基站要接受一个较强的下行链路信号，如图8.5所示。虽然这是增加Small Cell负载的一个非常简单和有效的方法，覆盖范围扩展必须小心使用，由于过强烈的偏置会导致一系列不确定的干扰，我们将在后面进行详细讨论。

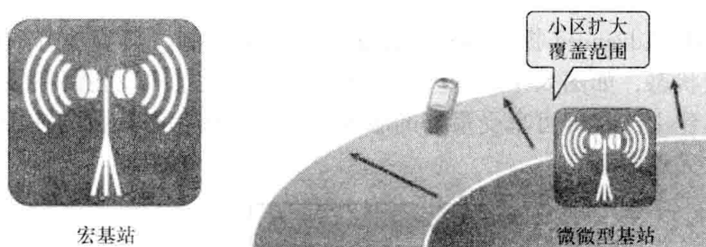


图8.5 通过Small Cell扩大覆盖范围来分流宏基站流量

8.3.2 连接状态的流量控制和移动性管理

在连接状态，网络侧决定在小区、无线接入技术或层之间执行切换。但是，这

个决定也建立在终端执行测量方法的基础上。然而，网络能够影响这些测量方法的频率和范围。在LTE和LTE-Advanced，网络能够提供每个终端载波频率的列表，然后终端通过给定的测量方法配置自动地搜索小区。网络可以进一步通过提供一个包含物理小区标识符（Identity，ID）的已确定的终端不应该测量的载波小区黑名单来影响这些测量的范围。

明显地，全系统的移动性管理要求基站间协调地进行信息交换。在LTE和LTE-Advanced，这种交换必须依靠X2接口的可用性。在交互无线接入技术方案的情况下，通过X2的信息交换可能被RAN测信息管理流程（RIM）取代。在一般情况下，必须确保对空闲和连接状态下的终端使用的所有流量控制和移动性管理方法是有序的，以避免乒乓效应或策略冲突。

8.3.3 家庭基站的流量控制和移动性管理

对于家庭基站而言，如果进行大量部署可能会在成运营商失去对其的控制。UE可以任意地移动或者在任意时间关掉一个家庭基站。因此，网络必须应对不断变化的环境。对于高密度的家庭基站，物理小区标识（Physical Cell Identity，PCI）的数量也会存在使用的限制导致潜在的歧义识别。此外，家庭基站可能受限于一个封闭用户群（Closed Subscriber Group，CSG），正如前面提到的，可以减少小区重选和切换选择。

在LTE和LTE-Advanced中，基站可以广播连接到封闭用户群的物理小区标识范围给终端，使封闭用户群家庭基站的处理变得容易。此外，UE运用一个自发的搜索功能而不管UE是何无线接入技术阵营。这个自发的搜索功能决定什么时间什么地点去搜索给予的封闭用户群小区。终端可以发送这些接近指示给它们的宏基站，说明它们接近一个能够连接到的家庭基站。例如，终端触发这种基于历史收集的封闭用户群数据，并且通过目前载波的活动迹象来识别。然而，确切的算法留给终端供应商来决定。这个选择可用于减少终端连接模式时执行的全部频率间测量的数量。

此外，Release 10中包含基于X2接口的家庭基站（HeNB）间的移动性增强。这主要针对家庭基站企业安装，在混合接入模式，家庭基站用相同的封闭用户群ID或者配置来部署。使用基于X2的切换可以减少核心网信令开销，且通常比基于S1的移动过程快。Release 10不支持在宏基站和家庭基站间基于X2的切换，也不支持通过家庭基站网关（Home eNodeB-GW）的X2互联。LTE Release 10中对不同基站节点关于移动性的异构网络接口如图8.6所示。

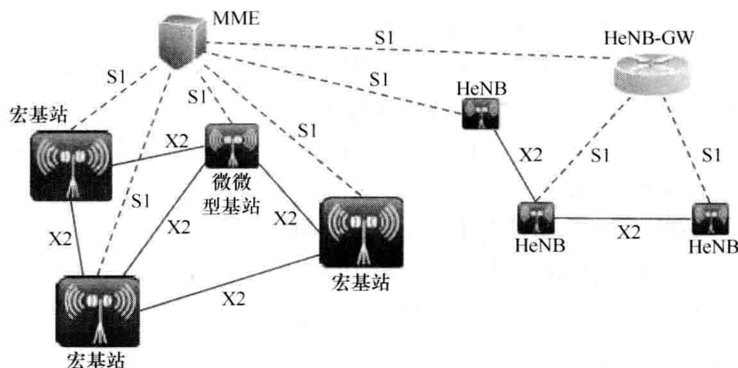


图 8.6 不同 LTE 基站关于移动性的接口

8.3.4 WiFi 分流

实际生活中，几乎所有智能手机和笔记本电脑都有 WLAN（WiFi 网络）连接。当 WiFi 网络连接可用的时候，终端的数据流量可以直接到 WiFi 网络。在运营商得到许可的频谱范围内，从移动网络流量转移能够减少阻塞并改善终端用户性能。当 UE 或终端选择 WiFi 网络连接，WiFi 网络转移不需要任何特殊的网络控制，但是仍可以获得 WiFi 网络分流的好处。

① 自动在蜂窝和运营商之间转换，WiFi 网络优先；

② WiFi 网络能够提供认证、鉴权和计费；

③ 网络可提供设备管理；

④ WiFi 网络接入到移动核心网的整合。

很多 UE 不熟悉 WiFi 网络技术，认为其昂贵且复杂，以致于不能通过 WiFi 网络连接获得所有需要的选择，因此没能有效地利用 WiFi 网络。当公共场所有大量 WiFi 网络时，用户较难于选择最合适的网络。网络控制方案根据运营商和终端用户的性能，使发现和选择 WiFi 网络变得简单。目标 WiFi 网络可以是家庭网络，运营商热点或合作方的 WiFi 网络。在蜂窝和 WiFi 网络间转换也基于应用需求。例如，当用户启动一个应用程序时，如浏览器，电子邮件或网络电台，设备选择一个自动的预配置 WiFi 网络，当它可用时取代使用的蜂窝网络。因此，WiFi 网络转移方案给提供运营商提供了保证流量转移给优先可用的 WiFi 网络，不用依赖用户的能力。自动选择成为接入网发现和选择功能（Access Network Discovery and Selection Function，ANDSF）。接入网发现和选择功能的目的是帮助终端发现非 3GPP 接入网，也就是 WiFi 网络，能用于通信和提供给终端监管连接到这些网络的规则。

在蜂窝和 WiFi 网络之间的选择类似于当国外旅行时的漫游网络选择。漫游网络的自动选择是基于本地运营商已提供的配置。然而，用户仍然可以自动选择，并

强制转移到另一个漫游网络。相同的逻辑应用到选择 WiFi 网络——用户仍然可以强制设备使用一个特定的接入网，但是很多用户喜欢自动选择网络。

运营商现有网络基础设施可提供认证、鉴权和计费（Authentication，Authorization and Accountion，AAA）。认证利用用户身份模块（SIM）卡，并对终端用户透明。目前，有各种各样的认证机制在使用，例如进入门户网站登录界面需要用户名和密码，SIM 和基于认证的证书等。如果通过 WiFi 网络接入时需要用户手动输入用户名和密码，很多用户会继续使用蜂窝网络而不是转移到 WiFi。因此无缝用户认证是一个转移流量到 WiFi 网络方案的促成者，其改善了 WiFi 网络的可用性。

设备管理已被用于业务中，如移动设备的接入点名称（APN）设置，在移动网络中避免手动配置，确保重要设备的工作毫无瑕疵。WiFi 网络转移方案复用现有设备管理，并扩展功能支持 WiFi 网络设置的业务，如 WiFi 网络设置的服务集标识（SSID）或 IP 语音。设备管理也能用于对加密通信的预共享密钥。

WiFi 网络接入能够被整合到移动核心网。这种整合允许 WiFi 网络用户使用现有设备基础设施，如计费和策略控制。当在蜂窝和 WiFi 网络之间切换时，整合也有助于服务的连续性。图 8.7 说明了这种整合到移动核心网的转移情况。隧道终止网关（Tunnel Termination Gateway，TTG）充当一个对设备和终端 IP 安全（IP Security，IPSec）来自终端连接的网关，提供对 WiFi 网络流量数据加密。隧道终止网关对用户使用基于 SIM 认证的 AAA 服务器。认证后，TTG 创建分组 PDP 上醒来去选择 GGSN。这使 GGSN 为 WiFi 网络复用现有分组核心服务基础设施。

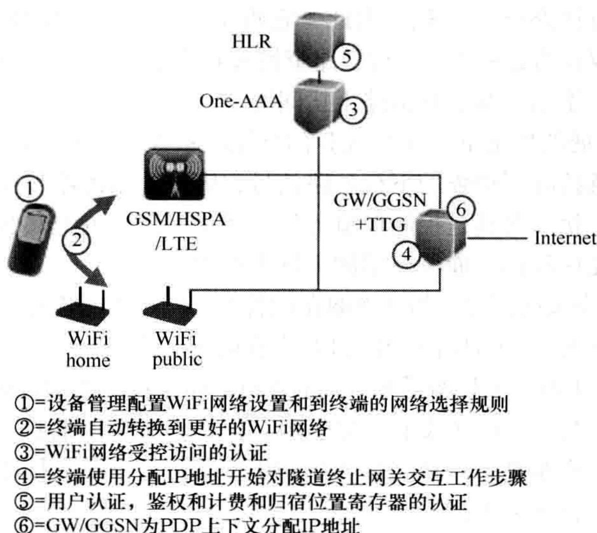


图 8.7 WiFi 网络整合到移动核心网的转移方案
（TTG = 隧道终止网关，AAA = 认证，鉴权和计费）

最后值得注意的是，3GPP 未规定任何无线电层次互连或在 3GPP 网络和 WiFi 网络之间的切换。反而，互连仅仅发生在核心网络层。

8.4 干扰管理

众所周知，在现今的移动通信系统中干扰是限制系统性能的主要因素。尤其是基站距离大约不超过 1km 的城市部署，在所有的蜂窝网络中复用所有的无线资源。然而这种情况在同构和异构部署中广泛存在。在异构网络中大型蜂窝网络和小型蜂窝网络使用不同的发射功率，这对于干扰问题提出了特殊的挑战，在这节中将会对相关问题进行讨论。

如图 8.8 所示建立一个简化的多层网络包含一个大型和一个小型基站，假设现在两个基站都复用所有可用的无线资源（即同频部署）。小型基站将使用一个明显比大型基站低级的下行链路发射功率。由于从接收到最强下行链路信号默认连接到小区的终端，这意味着小区边缘将更接近小型基站（粗线）。如果使用覆盖范围扩展，小区边缘将被移动到大型基站（细线）。起源于一个终端的上行链路信号的点，在这两个基站接收相等强度，将或多或少在这些的中间（虚线，定义为虚拟上行链路小区边缘）。在上行链路和下行链路中这些不同的小区边缘将导致以下特殊的干扰群：

A：在位置 A 的终端将被连接到大型小区，但是它的上行链路信号通过小型基站接收具有更好的性能。由于距已分配给它的基站相当远，UE 通常使用一个高发射功率去克服上行链路路径损耗，因此，它将给小型基站产生强烈的上行链路干扰。但是，如果仅仅将这些 UE 上行链路资源安排在总带宽的一小部分，则不会在其他物理资源块上不会引起上行链路干扰问题。

B：在范围扩展的情况下，在位置 B 的终端将被连接到 Small Cell。然而，实际上它从宏基站能够接收到更强的下行链路信号；因此数据传输和控制信道都要遭受强烈的下行链路干扰。尤其是控制信道上的干扰是一个严重的问题，会对范围扩展造成影响，除非使用我们下面将介绍的干扰协调方案。

C：干扰的一个极端情况。如果终端在位置 C，但是不能连接到小型基站，因为对接近的但不属于该小区封闭用户群的 UE 存在限制。那么，终端将对小型基站存在非常强的上行链路干扰，同样遭受非常强的下行链路干扰。通常被称为宏覆盖盲区。

最后，一类干扰群在图中没有明显表示，但是仍然是很重要。当多个小型基站在一起或邻近一个宏基站时，从终端连接到小型基站的许多上行链路信号的总量将对宏基站产生的上行链路干扰。

图 8.8 也说明了覆盖范围扩展对于干扰问题的影响。随着 Small Cell 覆盖范围的扩大，由于实际小区边缘向接近虚拟下行链路小区边缘移动干扰群 B 的可能性（如加重的下行链路干扰问题），它减少干扰群 A 的可能性（如减轻上行链路干扰

问题）。要注意的是干扰对于数据传输的影响可以通过链路自适应来减轻，但是其会严重影响控制信道性能导致终端失去与基站的全部连接。

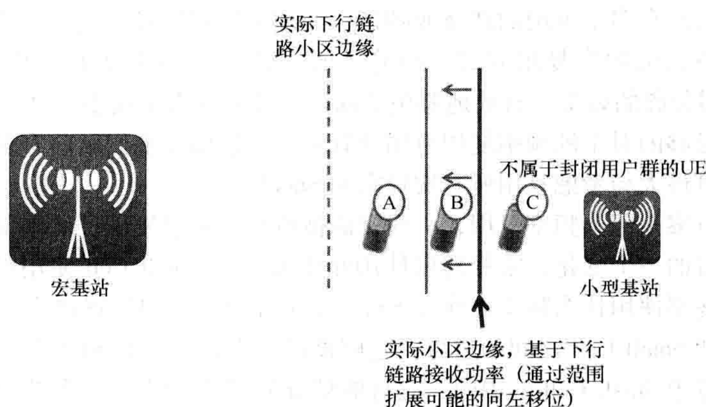


图 8.8 多层网络中最主要的干扰问题

现在的问题是如何避免或减少上述的干扰群。大体上，有以下选择：

1）避免小区间的完全资源复用脱离以降低不同覆盖层之间的干扰。对于不同覆盖层资源的划分方式可以：

① 时间和频率；

② 静态或动态的方式。

2）应用特定的功率控制规则减少不同覆盖层间的干扰。

在 LTE 和 LTE- Advanced 中对潜在的解决方案在图 8.9 进行了总结，将在下面的章节中进行详细阐述。

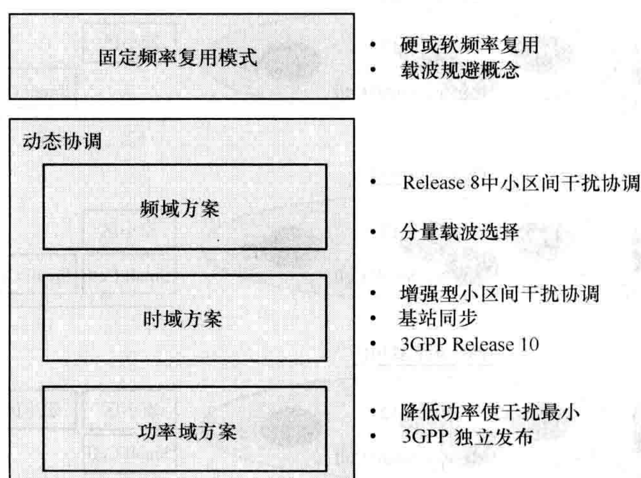


图 8.9 LTE- Advanced 接口管理方案

8.4.1　通过静态频率复用方式避免干扰

如果运营商有多个可用的载波或频带，处理干扰问题最直接的方式是避免同频部署并采用特定的频率复用方式。最简单的方式为硬频率复用，宏蜂窝和 Small Cell 分别采用分离的频带，有效地避免了前面所述的所有干扰群。然而，只有几个运营商拥有足够的对于硬频率复用可用的频谱，并且即使他们眼前有多个载波，他们为了使容量最大会考虑复用所有宏蜂窝和 Small Cell。

另一种方案是部分频率复用，一些资源被所有覆盖层复用，一些仅仅被单层复用。这样配置的一个变化，宏蜂窝仅使用频率 f2，而 Small Cell 使用频率 f2 或 f3。对一个特定终端使用什么频率去连接 Small Cell 可由终端的位置决定：如果位置接近于宏蜂窝和 Small Cell 之间的边界，它应该仅使用 f3 资源以致不会干扰宏基站的性能，如果位于 Small Cell 的中间，它可能被分配到 f2 频率。一个部分频率复用的替代配置是一个频率仅为宏基站保留。这种方案被称为载波规避。这种方案对避免前面所述的干扰群 C 尤其有利，如不能连接到附近的一个封闭用户群，家庭基站的 UE 能简单地采用载波规避的方式被宏蜂窝服，以致于不会存在干扰问题。所述的所有频率复用选项如图 8.10 所示。

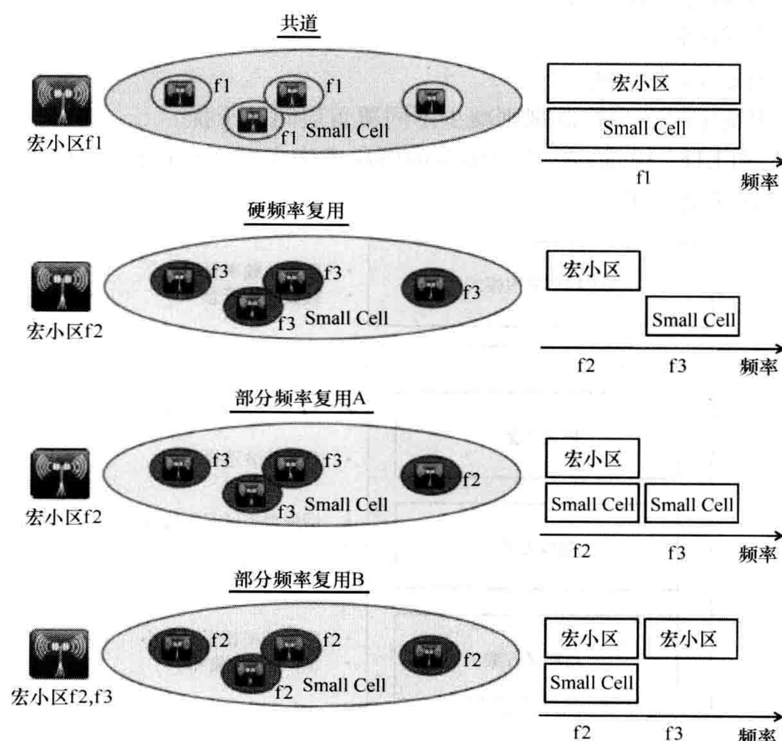


图 8.10　频率复用选项

8.4.2 频域的动态接口协调

大多数运营商没有足够的频谱资源来分别部署宏基站及 Small Cell。通常采用同频部署的场景，连同在邻小区间调整资源复用的动态方法。其中选择之一为对不同块的频谱有一个灵活的资源使用范围。LTE 的 Release 8 已经包括了通过交换负载和基站间的调度信息来动态协调同频小区间干扰的方案。当基站给终端分配资源时能够考虑到相关信息释放部分资源，以防止遭受或产生强烈的干扰。该方法被称为小区间干扰协调。这个方法包含两个主要问题：一方面，由于通过 X2 接口的信息交换延迟导致基站间协调减慢，因此需要在干扰协调和各个小区的频率选择性衰落增益之间进行折中。另一方面，在控制信道上基于干扰的调度方案无法减少小区间干扰问题。为了克服这两个问题，Release 10 提出了增强型小区间干扰协调作为动态干扰协调的一个时域方法，将在下一节进行详细说明。此外，基于载波的小区间干扰协调方案正在研究中，并将纳入即将来到的 LTE 版本中。其目的主要为管理密集部署的家庭基站间的干扰问题。在参考文献［3］中对这些技术进行了详细讨论。

8.4.3 时域的动态干扰协调

增强型小区间干扰协调的目标是对下行链路控制信道增加小区间干扰协调功能。增强型小区间干扰协调用来解决下述两种情况的下行链路同频干扰问题：

① 宏基站和微微型基站场景：通过有效地处理图 8.8 中的干扰问题 B 使微微型小区更大范围扩展。

② 宏基站封闭用户群的家庭基站：当宏基站 UE 接近同频家庭基站时，改善宏基站覆盖范围；也就是，处理之前提到的图 8.8 中的干扰群 C。

该方案的基本原理是一些子帧通过使用几乎空白子帧（Almost Blank Subframe, ABS）部分消除干扰。几乎空白子帧仅传输公共参考信号（Common Reference Signals, CRS）和其他强制公用信道不传输数据。因此，一个基站使用 ABS 进行传输时，其对周围小区的干扰减小。图 8.11 说明了该方案在宏基站和微微型基站间的工作原理。当一个基站采用 ABS 时，微微型基站在该子帧上来服务距离微微型基站较远的 UE。宏基站和微微型基站都能复用其他子帧，例如，微微型基站能使用其他子帧服务距离其较近的 UE。ABS 的好处是微微型基站能服务更多 UE，缺点是损失部分宏基站容量。图 8.12 给出了 ABS 在宏基站和封闭用户群家庭基站间的应用。这种情况下，如果家庭基站采用了 ABS，宏基站 UE 仍能成功地接收靠近家庭基站的信号。

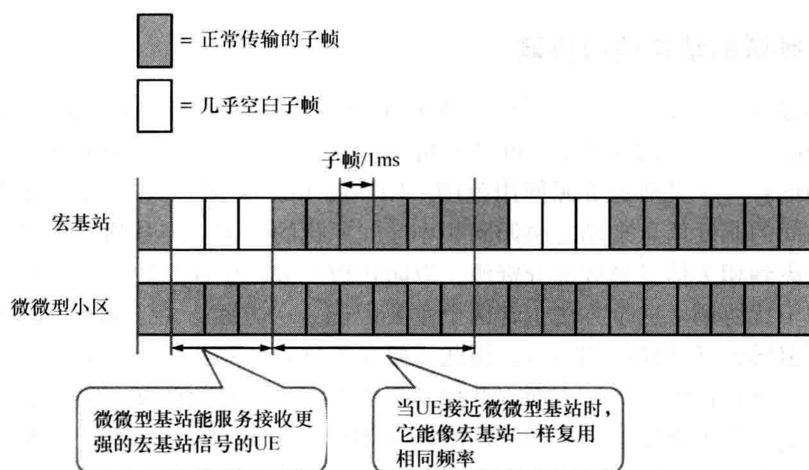


图 8.11　宏基站和微微型基站间的增强型小区间干扰协调

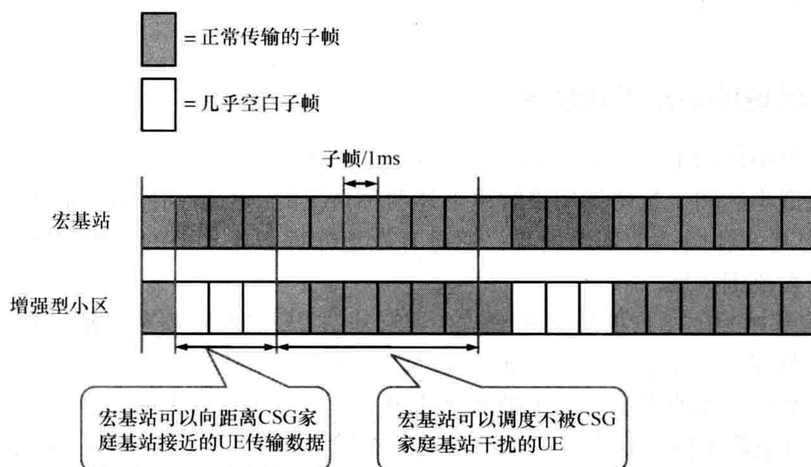


图 8.12　宏基站和封闭用户群家庭基站间的增强型小区间干扰协调

增强型小区间干扰协调要求宏基站和 Small Cell 同步，并协调基站间的 ABS 模式。ABS 配置可以通过 X2 接口进行动态修改。一般情况下，X2 接口在宏基站和微微型基站间存在，而在宏基站和家庭基站间不可用。在家庭基站中 ABS 配置是半静态的，其通过 O&M 来控制，如图 8.13 所示。在 Release 10 中新的信息单元已经增加到 X2 应用协议，允许基站间的 ABS 模式配置。虽然 3GPP 标准化了新 X2 信令，但是基站算法没有标准化，由供应商特定。基站间的 ABS 模式的自适应性比基站中快速无线资源管理的（Radio Resource Management，RRM）慢。RRM 功能

以 ms 的分辨率计算，而 ABS 模式的修改一般每几百 ms 或者几 s 发生一次。ABS 模式的修改仅会引起 X2 信令较小的负载。

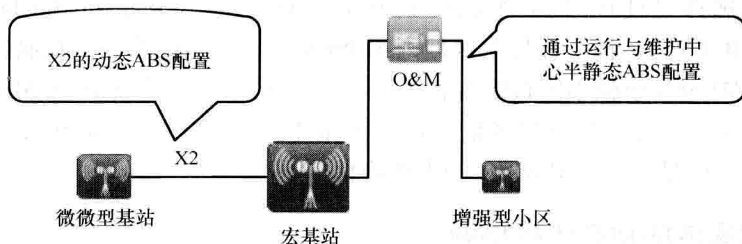


图 8.13 几乎空白子帧配置

高效利用 ABS 需要知道终端哪些帧被配置为 ABS。3GPP 在 Release 10 中定义了 ABS，其后向兼容 Release 8 的 UE，以保证其能与新的 Release 10 用户设备共存。由于这个原因，ABS 并非完全空白，其仍需传输一些公用信道信息，如：

① 公共参考信号；

② 公共信道（同步信道、主要信息块、系统信息块（SIB）1、寻呼、位置参考信号），SIB1/寻呼相应的物理下行链路控制信道和信道状态信息参考信号。

周期地使用 ABS 自然地导致时变干扰波动。例如，一个 pico 基站服务的 UE 将明显经历不同的信道质量，这取决于宏基站使用正常传输还是使用 ABS。相似地，一个接近 CSG 家庭基站的宏基站 UE 也将经历不同的信道质量，其取决于是家庭基站传输 ABS 子帧还是正常子帧。因此，对于 Release 10 的 UE 可以配置相应的时域测量限制：

① 信道状态信息（Channel State Information，CSI）包括信道质量信息（Channel Quality Information，CQI），预编码矩阵信息（Precoding Matrix Information，PMI）和秩指示。Release 10 版本允许配置 UE 报告单独的 CSI 取决于干扰的小区使用 ABS 还是正常传输。

② 为了切换目的的无线资源管理测量包括参考信号接收功率（Reference Signal Received Power，RSRP）和参考信号接收质量（Reference Signal Received Quality，RSRQ）。Release 10 允许被微微型基站服务的 UE 在宏基站使用 ABS 子帧时仅执行 RSRQ 测量。

③ 无线链路监测定义无线链路是否已经发生失败。Release 10 允许配置宏基站 UE 仅执行无线链路监测使用 ABS 子帧的封闭用户群家庭基站。

因此，随着网络配置的 UE 测量限制，仍能使用准确的链路自适应和基于信道状态信息反馈的信道感知分组调度。相似地，基于 UE 无线资源管理测量和无线链路测量的可靠移动性决策也不会受到影响。无线资源控制信令配置测量限制，仅在

连接模式的同频测量有效。Release 8 或 Release 9 UE 不支持 UE 测量限制的配置。因此，在那些使用 ABS 的网络，传统的 UE 将经历更低的测量性能。

另一个选择是使用多播/组播单频网络（Multicast Broadcast Single Frequency Network，MBSFN）子帧。在控制区域内 MBSFN 子帧仅传输第一个控制符号和公共参考信号。MBSFN 子帧不能被配置在子帧0，4，5，9。对比 ABS 和 MBSFN 子帧：ABS 使用更灵活，仅在公共参考信号位置产生干扰。MBSFN 子帧允许发送上行链路调度授权，但是以来自 PDCCH 的干扰为代价。

8.4.4　功率域的动态干扰协调

在异构部署中，除了在频域和时域动态干扰协调，也能通过功率控制的方式来减少干扰的影响。

例如，图 8.8 中的干扰群 A，Small Cell 从一个分配到宏基站的终端上遭受强烈的上行链路干扰，通过适合的方式降低终端发射功率可以将干扰减轻到一个确定的程度。相似地，由很多宏基站附近的家庭基站 UE 引起的上行链路干扰也能够降低。这两种情况下，UE 传输功率的规则描述如下：

$$P = 10\log_{10}(PRBs) + P_0 + \alpha PL + \Delta MCS + Closed_{\text{loop}} \tag{8.1}$$

这里 PRB 是调度的物理资源块数量；P_0 是标准化的传输功率密度；α 是路径损耗补偿因数；PL 是路径损耗；ΔMCS 是对选择调制和编码方案的质量要求。如果 $\alpha = 1$，路径损耗通过功率控制被完全补偿。如果 $\alpha < 1$，使用的是部分功率控制。

对于同频部署宏基站和微微型基站的情况，为了实现最好上行链路性能，推荐对宏和微微型层分别使用不同的 P_0 设置和 α 设置。根据经验，两层之间 P_0 的偏移量应该在同一数量级，由于宏基站和微微型基站在下行链路传输功率级的差异，微微层的 α 应稍小。然而，上行链路功率控制参数的最佳选择在实际中取决于很多因素，因此需要相应地适应。这里，选择包括使用功率控制机制的闭环元件，和功率控制参数的自动调谐一样能使上行链路需要的关键绩效指标最大化。总之，必须意识到功率控制修改总是导致一个交换，即提高一个基站的性能，将对其他基站不利，所以，干扰协调参数也取决于移动网络运营商多方面的考虑。

8.5　性能分析

在本节中，我们对于前述的相关分流方案和干扰管理解决方案在异构场景的仿真性能进行分析。

8.5.1　宏小区和室外微微型小区场景

本节总结了宏小区和室外微微型小区使用同频部署带来的性能增益。结果的仿

真服从3GPP的评估方法[4]。网络的拓结构是由三扇区组成的常规正六边形网格，每个宏小区伴随着1~10个室外部署的微微型小区，也就是每三扇区宏基站总共有3~30个微微型小区。宏基站使用46dBm的发射功率和14dBi的天线增益，等效全向辐射功率（Equivalent Isotropic Radiated Power，EIRP）为60dBm。微微型基站使用30dBm的发射功率和5dBi增益的全向天线，也就是35dBm的EIRP。假设下行链路采用2×2MIMO秩自适应方式。假设UE是分均匀分布的，在微微型小区附近具有高空间密度的UE，用来模拟微微型小区部署在热点区域的场景，相应的场景在4b中给出了定义[4]。

部署微微型eNB后下行链路的归一化吞吐量增益如图8.14所示。归一化是相对于没有微微型小区的场景。假定同信道部署未采用增强型小区间干扰协调及覆盖范围扩展。从图中可以看到宏小区和微微型小区简单的同频部署带来显著的增益。正如预期，性能增益随着Pico小区数量的增长，且用户吞吐量也随之增加。当在每个宏小区放置10个微微型小区后，用户的吞吐量增长超过了三倍。因此，用户吞吐量的增加低于可用的小区数量的增加，因为增加小区会产生更多的干扰。通过应用eICIC，可进一步提高系统的性能，因为通过分配更大的RE给微微型小区，可以使得负载更多的接入Pico-eNB。通过周期性的使用ABS来减少宏小区的干扰，这样可以产生更大的RE。图8.15显示了被微微型eNB服务的用户百分比与RE偏移的关系图，微微型小区UE的百分比取决于两个因素：每个宏小区中微微型小区的数量和RE偏移。增加RE偏移明显改变了平衡，因此更多的UE将会从宏小区层卸载到微微型小区。举个例子，在每个宏小区有4个微微型小区的场景中用10dB的RE偏移，微微UE百分比从40%（0dB RE）增长到70%。

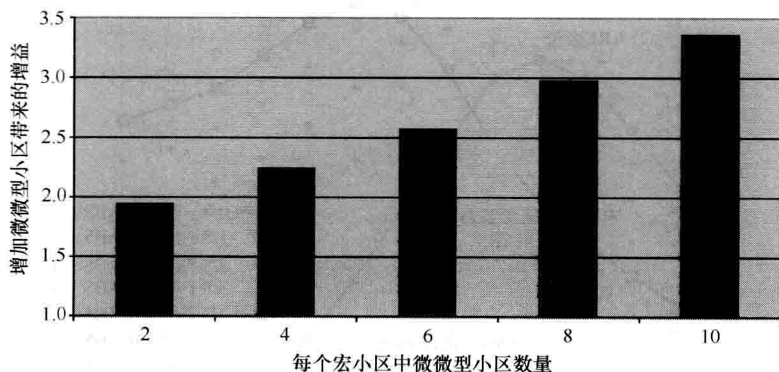


图8.14 归一化的UE吞吐量性能增益在部署微微型eNB的场景与只有宏小区的场景比较。没有使用eICIC或覆盖范围扩展

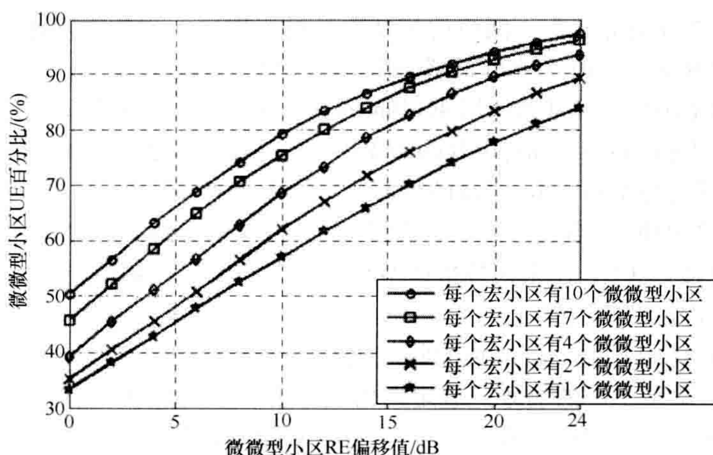


图 8.15 微微 UE 百分比与微微 RE 偏移

图 8.16 给出了每个宏小区中部署 4 个微微型小区的场景下 5% CDF 点的吞吐量性能。图中给出在不同的 ABS 配置比例条件下不同的 RE 值与系统吞吐量之间的关系。从这些结果中观察到，在每 8 个子帧中配置 4 个 ABS 和 14dB 的 RE 时系统达到最佳性能。如果 RE 值超过了 14dB，性能将会下降，这意味着卸载过多的 UE 到微微型小区。同样地，系统的性能与宏小区配置的 ABS 数量有关。如果过多的子帧被配置为 ABS，宏小区 UE 可分配的资源将会减小；如果 ABS 配置过少，对于微微型小区干扰的减少量将不足。因此，为了有效地利用 eICIC，协调设置 ABS 的比例和 RE 偏移非常重要，在 Release 10 规范中通过 X2 信令来支持小区间的协调。

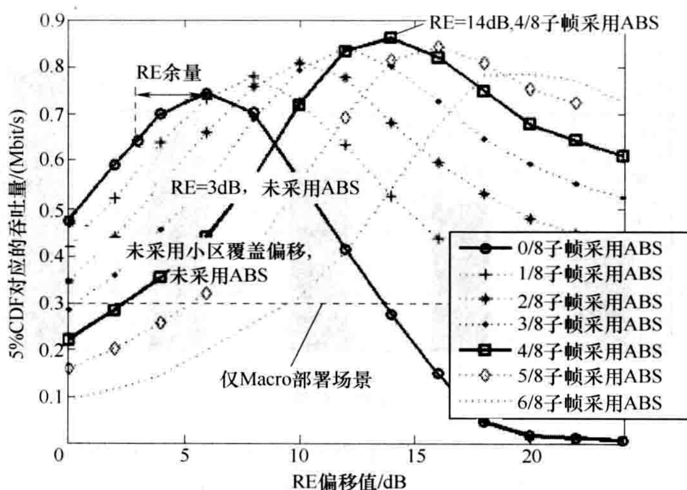


图 8.16 不同的 ABS 配置比例下系统性能与微微层 RE 偏移值的关系

需要注意的是图 8.16 还包括一条曲线是在宏小区中未采用 ABS 的情况。这时系统性能在 RE 为 6dB 时达到最大。然而，考虑到 3dB 的切换余量，最大推荐的 RE 偏移在宏小区不采用 ABS 的情况下为 0～3dB；否则将会经历高切换失败率和无线链路失败的风险。图 8.17 显示了相应的用户吞吐量性能在 Pico 小区采用/不采用 eICIC 及只有宏小区的情况。每个宏小区有 4 个微微型小区时吞吐量是不采用 eICIC 时的 2.2 倍，而如果采用额 ICIC，系统吞吐量增加到 4.1 倍。对于所考虑的情况下，eICIC 增益变化在 1.4～1.9，具体取决于每个宏小区中微微型小区的数量。eICIC 增益随着微微型小区的数量增加，但在每个宏小区中有 4 个微微型小区时达到饱和。对于较高数目的微微型小区，eICIC 增益基本相同。这可以理解为对于较高数目的微微型小区，微微型小区开始有相当不错的整体覆盖，并且微微型小区之间的干扰开始变得更加重要，这是 eICIC 不能解决的。在图 8.17 中，RE 值在每种情况下都做了优化，分别从 2 个微微型小区 10dB 到 10 个微微型小区 20dB。

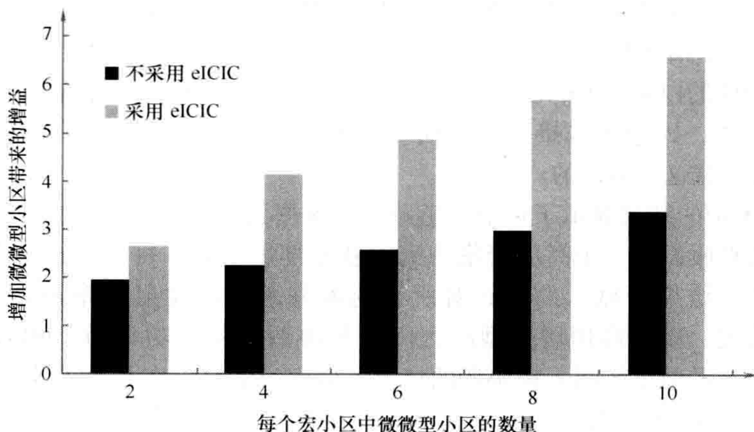


图 8.17　相应的 eICIC 性能在每个宏小区有不同微微小区数量下（2 = 两倍数据速率）

所有结果为室外部署微微型基站在 30dBm 发射功率的情况下，如果发送功率被进一步降低，例如，24dBm 对应于 3GPP 本地基站类型，相应的 eICIC 增益将进一步增加。这是由于宏小区的干扰变得相对较强，采用 ABS 将带来更大的好处。相似地，如果微微型区的发送功率增加至典型的微小区的水平，eICIC 增益降低。然而，尽管 eICIC 的相对性能增益可通过降低微微型小区的发射功来提高率，但随着发射功率的增加用户吞吐量性能通常会提高。

对于室内部署微微型小区的情况，eICIC 增益较小。这主要因为室内微微型小区只会服务室内 UE，这不需要使用大的 RE 值。采用大的 RE 偏移和 ABS 来将更多的室外 UE 转移到微微型小区的服务下通常不是最优的方案。

UE 种类同样在使用 eICIC 的性能利益上有影响。正如前面所讨论的，

Release 10终端支持对 CSI，RRM 和 RLM 配置测量限制。其次，为实现最高的 eICIC 性能，终端需要有先进带有干扰抑制功能的接收器，抑制来自 ABS 的残余干扰，如 CRS 干扰。在本章呈现的 eICIC 结果是在假设这种终端支持下获得的。因此，对于传统的 UE 没有定制 eICIC 支持的情况下，eICIC 性能增益可能会降低。

8.5.2　宏小区和家庭基站场景

从干扰的角度来看，将宏小区和 CSG 家庭基站部署在相同频率是最具挑战性的情况之一。特别是在下行链路，CSG 家庭基站可能会导致宏小区层面产生覆盖漏洞（之前在干扰场景 C 中介绍过）。目前研究者正在通过应用 3GPP[4] 中所定义的室内场景，进行一系列系统级的仿真，对上述效应进行分析。这个场景包括一个普通的三扇区宏小区层面以及一个室内部署了家庭基站的多层公寓建筑结构。其中，每个家庭基站的最大发射功率是 20dBm。该建筑结构包括两个平行的建筑块，每一个建筑块在每层都有 20 个公寓——因此给场景取名叫做双列场景。在每个公寓内部都有一个活跃的家庭基站，假设有一个已经拥有匹配 CSG ID 的 UE。除了这些配置了 CSG 的白名单 UE 之外，80% 的宏小区 UE 也随机的分布在室内，它们没有配置 CSG ID，因而无法接入到任何一个家庭基站。以下的仿真结果都是基于 10MHz 系统带宽这一假设的。

图 8.18 中的结果显示了在下行链路目标速率为 200kbit/s 时的宏小区层面中断概率。仿真假设在一个高度密集的家庭基站部署场景，每个建筑有 48 个活跃的家庭基站。结果所显示的是针对所有的家庭基站的发射功率都是 20dBm 或 10dBm 的情况，以及启用增强型小区间干扰协调且发射功率为 20dBm 的情况。对于前面的增强型小区间干扰协调的情况，假定家庭基站在八个子帧中的一个使用 ABS。由图 8.18 中的结果可以看出，不存在任何干扰管理行为时，宏小区和 CSG 家庭基站的同频部署确实会造成宏小区层面的中断。降低家庭基站的功率控制可以获得额外的好处，这可以大大降低中断概率。但是，为了避免宏小区覆盖漏洞的产生，在宏小区和家庭基站之间进行资源分配的协调是非常必要的。在这里，增强型小区间干扰协调就是一个选择，它可以清晰地带来额外的好处。需要注意的是，这里 eICIC 的结果是在宏小区和家庭基站时钟同步以及 Release 10 的 UE 支持配置无线资源管理、无线链路管理和信道状态信息测量限制的假设下得到的。

图 8.19 给出了终端用户吞吐量的累积分布函数的例子。可以看到，相对于宏小区层面的 UE 来说，由家庭基站提供服务的 UE 通常能够获得更高的吞吐量。这主要是由于家庭基站的 UE 更靠近它们的服务小区基站，在每个传输时间间隔内可以在整个带宽上进行调度。相反地，宏小区 UE 距离服务小区基站较远，通常需要与很多其他宏小区 UE 进行复用，使得每个 UE 获得的基站资源较少。然而，随着

家庭基站的采用，一些 UE 转移到家庭基站，宏小区中共享调度资源的 UE 数量减少，使得留在宏小区中的 UE 的吞吐量得到提升。

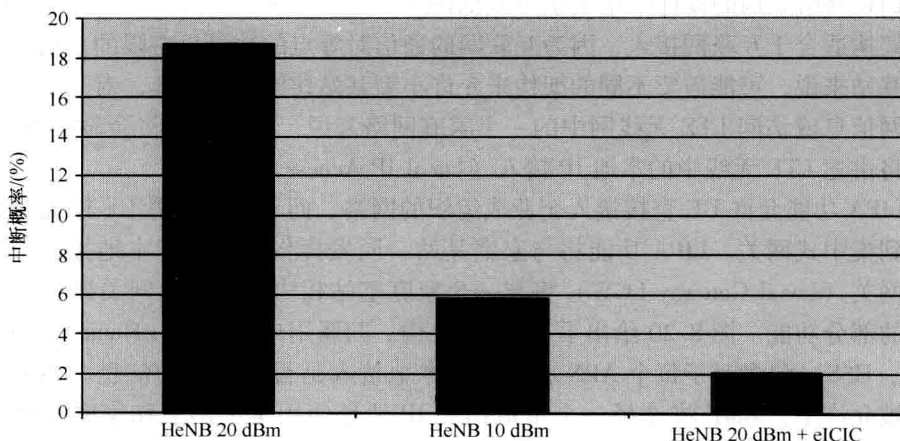


图 8.18　基于家庭基站配置的 200kbit/s 下宏小区 UE 中断概率

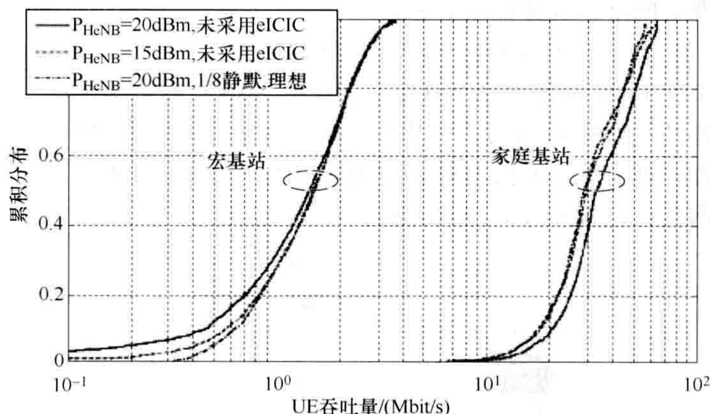


图 8.19　宏小区 UE 和家庭基站 UE 吞吐量分布[5]

家庭基站的引入将会为所有 UE 在用户吞吐量上提供好处。对于文中所给出的场景，家庭基站 UE 可以获得 10～30Mbit/s 的速率。因而，家庭基站 UE 的吞吐量与典型宏小区平均吞吐量相当。然而，对于家庭基站，这取决于可用的回程连接数，其实际上可能会成为家庭基站 UE 的限制因素。在仿真中，家庭基站的回程连接数是不受限制的。

8.6 LIPA

LTE 网络架构的设计采用了集中式的网关，运营商通常只有一个或几个网关。这种架构适合于互联网接入，因为互联网的通信对等点的数量是有限的。然而，对家庭基站来说，可能需要不同的架构来允许小型基站访问本地内容。对于访问企业内部网信息或访问 LTE 无线网中的一个家庭网络来说，本地接入将会显得很实际。本节将讲述 LTE 无线中的本地 IP 接入（Local IP Access，LIPA）。

LIPA 功能允许 UE 直接接入企业或组织的网络，而不用首先将 UE 层面的数据传输到集中式网关。LIPA 功能将与家庭基站一同发挥作用。对于本地接入，一个本地网关（Local Gateway LGW）将与一个家庭基站相协作。本地网关拥有主 PDN 网关的部分功能。图 8.20 给出了 LIPA 的架构。归属用户服务器（Home Subscriber Serve，HSS）包含对于每个 APN 和子载波本地接入是否被允许的信息。如果本地接入被允许了，MME 将选择一个本地网关 IP 地址使用本地网关和家庭基站之间 UE 平面的直连路径。多个 PDN 连接也是有可能的：一个连到宏小区网络的 PGW，两个连接到本地网关。LGW 可以通过一个 S5 接口进行控制。

LPIA 需要对网络组成进行以下更新。

① HSS：给出每一个 APN 的 LIPA 许可标志；

② S1 接口：LGW 地址由家庭基站在初始的 NAS 消息中提供；

③ 家庭基站：通过 LGW 引导 LIPA 承载，在交接后删除 LIPA 承载；

④ 移动性管理实体：通过 HSS 消息决定是否可以提供 LIPA；

⑤ 本地网关：包含部分 PGW 功能的一些网络功能。

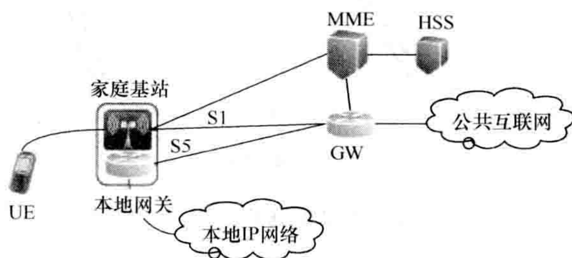


图 8.20 本地 IP 接入架构

需要注意的是 LIPA 不需要在 UE 和宏小区进行任何改变。

运营商从 LIPA 中得到的好处主要是核心网流量的分流。直接本地访问也可以看作是一项客户服务。本地接入可以提高 LTE 网络在住宅和企业领域的应用率。

3GPP 在 Release 10 中定义了第一组 LIPA 功能。在 Release 10 中不支持移动

性。如果 UE 移出家庭基站覆盖区域，连接是无效的。将会用一个新的 IP 地址建立一个新的与宏网关相连的连接。因此，Release 10 的解决方案主要是针对每个公寓只有一个家庭基站的居住场景。Release 11 包含了在不同家庭基站间的移动性，这对于规模较大的企业将更有效率。

8.7 小结

数据流量的增长速度驱动了微小区的首次出现，因为宏小区的容量将被耗尽，即便有更多的频谱和更高级的功能被应用于宏小区。从硬件和优化的角度来看，小型基站越来越有吸引力：基站的尺寸变小，先进的自组织网络算法使得配置和优化更简单。简而言之，微小区现在被流量的快速增长和新产品的便捷部署驱动着。

不同小区间的智能流量管理可以带来最好的终端 UE 性能和最大容量。流量管理需要考虑信号电平、负载、服务需求和移动性。

利用 WiFi 网络分流携带部分流量是一个有吸引力的节约移动网络容量方法。最新的 WiFi 网络分流解决方案具有动态的网络选择、自动身份认证和移动核心网融合等功能，使得 WiFi 网络成为移动网络不可或缺的一部分。

异构网络间操作的一个固有的挑战在于不同小区间的干扰。微小区可能会被推移到一个与宏小区不同的频带或者在所谓的同频部署场景下被分配在同一个频带。同频部署情况提供了最高的系统总容量，但是需要更先进的功能和算法来缓解宏小区和微小区间的干扰。为此，LTE 在 Release 8 中允许频域和功率上的协作，在 Release 10中允许时域上的协作，也被称为增强型干扰协调。仿真结果显示，室外微小区和室内家庭基站可以在宏小区频带上共存。室外微小区可以将平均数据速率提高四倍。具有 eICIC 功能的 CSG 家庭基站可以与宏小区共存。

参考文献

1. 3GPP, Tech. Spec. TS 36.104 (March 2012) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception, V.10.6.0.
2. Szufarska, A., Safjan, K., Pedersen, K.I. and Frederiksen, F. (2011) Interference mitigation methods for LTE networks with macro and HeNB deployments. IEEE Proc. Vehicular Technology Conference (VTC-fall), September 2011.
3. Garcia, L., Pedersen, K.I. and Mogensen, P.E. (2009) Autonomous component carrier selection: Interference management in local area environments for LTE-advanced. IEEE Communications Magazine, September 2009.
4. 3GPP Tech. Spec. TR 36.814 (March 2010) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9), V.9.00.
5. Wang, Y. and Pedersen, K.I. (2011) Time and power domain interference management for LTE networks with macro-cells and HeNBs. IEEE Proc. Vehicular technology Conference (VTC-fall), September 2011.

第9章 中 继

Harri Holma, Bernhard Raaf and Simone Redana

9.1 简介

信号较强时，LTE 和 LTE-Advanced 无线接入可提供非常高的数据速率，比特率甚至可达 1Gbit/s。当信号弱的时候，例如在室内场景，数据传输速率将大大低于理论峰值数据传输速率。初始的 LTE 部署使用较大范围的宏小区，无法在整个覆盖范围提供高数据速率。此时，需要扩大 LTE 的覆盖范围。通过安装更多的宏基站或更多的小型基站，可提高覆盖范围。额外的基站提高了覆盖范围和容量。建设新基站的挑战通常在于寻找合适的站址和组织有效的传输连接。另一个提高覆盖的方法是使用 RF 中继器。RF 中继可以提高信号强度，但同时也将放大干扰。中继的干扰控制已成为现网的一个挑战。在 3GPP Release 10 中移入了提高网络覆盖的另一种方式：中继。中继节点的主要思路是利用同一个 LTE 空中接口作为回程连接，这使得中继安装简单，因为无需单独的传输设置。此外，中继节点也可以是很小的设备，比如可将它们部署在灯柱上。不论是从 UE 端或从核心网端看，中继节点的设计与 Release 8 都是后向兼容的。对 UE 来说中继节点看起来像 Release 8 的 eNB。不论是在时域还是频域，接入和回程链路都是分离的，这就避免了任何自干扰问题。中继概念的概述见图 9.1，其中接入链路是指 UE 和中继节点之间的连接，回程链路是指中继节点和 eNB 之间的连接。

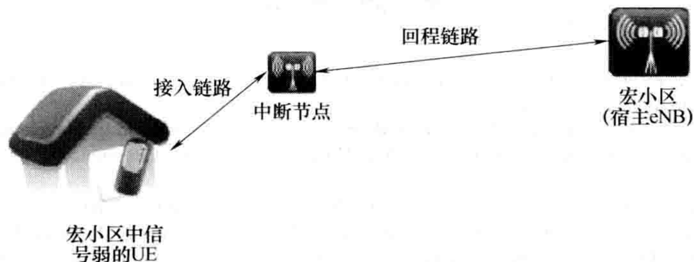


图 9.1 3GPP 中继概念的概述

本章将首先介绍中继节点的物理层、架构、协议以及无线资源管理。其中，通过仿真结果来分析覆盖和容量方面的，通过举例来阐述成本的优势。9.2 节给出了

中继的总体概述，9.3 节介绍了中继物理层，9.4 节介绍了中继架构和协议，9.5 节介绍了无线资源管理。9.6 节阐述了覆盖和容量的仿真增益，9.7 节讨论了未来中继的增强，9.8 节给出了本章内容的总结。

3GPP 文档中会给出更多信息。中继标准化工作开始时，3GPP 首先收集了参考文献[1]中相关的仿真假设和参考文献[2] [3]中的架构方案作为标准化需求，随后在参考文献[4]中确定了物理层功能，RRC 和 PDCP 增强协议在参考文献[5][6]中确定，S1 和 X2 增强接口在参考文献[7][8]中确定。性能要求、评估测试过程的方法在参考文献 [9] 中给出。

9.2　总览

UE 和中继节点之间的接入链路（Uu 口）基于 Release 8 协议的规定，中继节点和 eNB 之间的回程链路（Un 口）在 Release 10 中标准化并复用空中接口（Uu 口）的协议。控制层面和用户层面的接入链路无线协议都终止于中继节点，从 UE 角度看，中继节点类似于 eNB。因此，中继节点是后向兼容的，传统的 Release 8 的 UE 可以连接到 Release 10 的中继节点。而从核心网的角度看，中继节点类似于宿主 eNB 额外的扇区。类似的，从相邻的 eNB 角度出发，宿主 eNB 可以看作是 S1 和 X2 接口同中继节点之间的代理节点，实现中继节点同核心网和相邻 eNB 之间的通信。图 9.2[3] 中描述了架构概况，对应了 3GPP[2] 中两个讨论的替代方案。

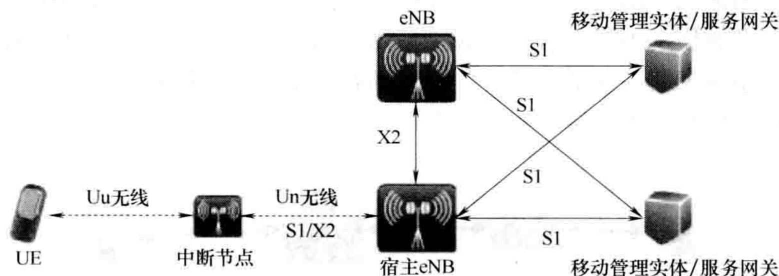


图 9.2　3GPP 中继架构和接口

与接入链路相比，回程链路会有一些增强[3]。无线资源控制层[5]具有配置、重配子帧的功能，可以调整回程和接入链路的资源分配。中继节点可在 RRC 连接建立时从 eNB 请求一个配置，RRC 层也有更新中继系统信息的功能。在用户层面也有一些增强：因 PDCP 层被用来承载终止于中继节点的 S1 和 X2 控制信息，因此它将为回程链路的用户层面提供完整性保护。

为了实现接入和回程链路共用同一个载波[4]，必须要进行回程链路物理层的增强。空口接口将及时分离出 Uu 和 Un，因此控制和数据信令都需要进行中继专属的扩展。

9.3　物理层

在中继标准化工作开始时，3GPP 首先收集了参考文献［1］中相关的仿真假设作为标准化需求，随后是参考文献［4］中确定了物理层功能。物理层功能将在本章接下来部分阐述。

9.3.1　带内和带外中继

有不同的方案来共享接入和回程链路的容量。中继节点需要在四个不同的单向链路上操作：UE 和 eNB 的上行和下行链路。带内中继的接入和回程链路使用同一频带，而带外中继的则使用不同频带。带内中继情况下，接入和回程链路在时域上是分开的。带内和带外中继的不同之处如图 9.3 中阐述。

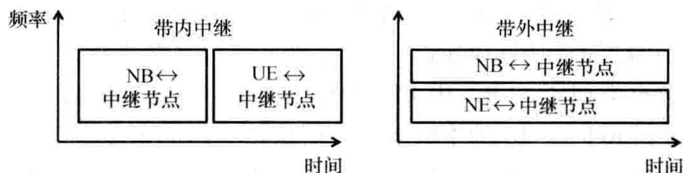


图 9.3　带内和带外中继的原则

频率使用情况如图 9.4 中展示。带内中继情况下，回程和接入链路共享同一频带；而带外中继使用不同频带。从频谱使用的角度看，带内中继更加高效，因为接入和回程链路共享同一频谱。另外，由于回程链路并未使用接入链路的容量和更多开销的频带，因此带外中继可提供更多的容量。

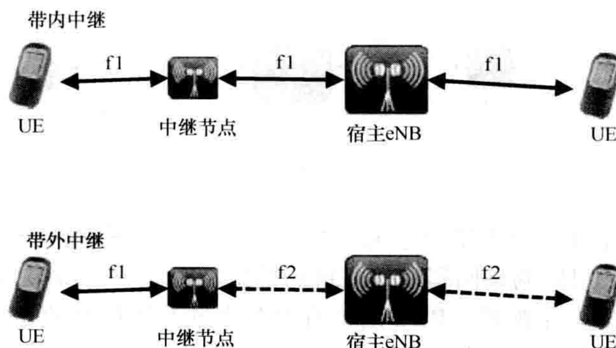


图 9.4　带内和带外中继的频率使用

带内和带外中继获得同一频谱时，它们容量相近，但因为回程和接入链路之间

是时分的，带内引入更高的时延。带外需要足够的分离度（频率间隔，滤波器等）来消除接入和回程链路的邻频干扰。

9.3.2　子帧

带内中继的设计目标是在时域分离时传输和接收，以避开传统无线直放站的干扰问题。物理层的设计必须支持不同时间发生的中继传输和接收功能。Release 8 已经内置支持时分操作——通过所谓多播广播单频网子帧实现。多媒体广播多播服务系统设计在 Release 8 中尚未完成，但物理层对 MBSFN 子帧的支持已经纳入 Release 8,以允许在下一个版本引入 MBMS。MBSFN 子帧包括了简短的控制部分，其中大多数帧都是为了多播传输的实现。MBSFN 子帧可以很好地用于基站到中继的传输，因为 UE 在这些子帧传输时并不需要中继的任何特定传输。MBSFN 子帧结构在图 9.5 中阐述，MBSFN 在中继传输中的使用在图 9.6 中阐述。

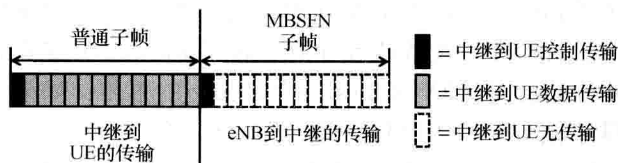


图 9.5　MBSFN 子帧的使用

带外中继物理层的设计可与 Uu 设计相同，而带内中继则需要接入链路的一些变化。接入链路的物理下行链路控制信道使用共同参考信号作为参考，在整个频带、子帧的前几个符号发送。之所以采用这种方法，是因为许多 UE 信号交错直接连接到 eNB，R-PDCCH 集中在频域中的几个资源块。R-PDCCH 也可使用专用解调参考信号，可使用波束赋形通过各个中继发送。数据由中继 PDSCH（R-PDSCH）承载。R-PDCCH 预编码与 R-PDSCH 上数据的预编码不同，图 9.7 阐述了新信道的示例，该示例中采用了两个中继节点。在 3GPP 规范中，每个基站可以支持多个的中继。

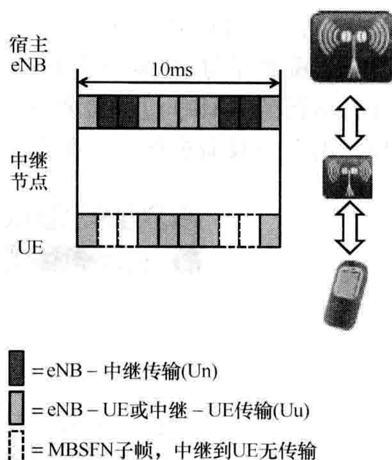


图 9.6　带内中继的子帧

R-PDCCH 用于通过给不同中继动态分配资源，这些中继采用半静态的方式将子帧分配给下行回程链路数据。R-PDCCH 也被用来动态的给上行回程链路数据分配资源。R-PDCCH 会在当前子帧分配下行链

路资源，在4ms后的相应上行链路子帧分配上行链路资源。R-PDCCH从足够晚的子帧的一个OFDM符号开始传输，使得中继有时间完成MBSFN子帧到其UE的控制部分传输，同时也考虑了传播时延和开关时间。

图9.7　回程链路的控制信道结构（Un）

9.3.3　重传

混合自动重传请求（Hybrid Automatic Repeat-reQuest，HARQ）通过重传错误接收包来恢复链路错误。LTE中重传时延为8ms。上行链路方向为同步，采用8ms的重传时延，而下行链路方向为异步，允许多余8ms的时延。总共可并行运行8个HARQ过程。中继不能采用上述相同的方法，因为MBSFN子帧只能分配给10个中的6个，因此不能严格按每8ms的周期分配它们。剩下的4个子帧承载UE必要的信息，如同步信号，标示小区配置或寻呼消息的广播信息。中继的解决方案是保持8ms重传周期，并分配给MBSFN每8ms一个名义上的重传：如果子帧号8在该集合内且在那个特殊子帧可配置MBSFN子帧，选择{0，1，2，……7}的子集来配置MBSFN子帧。否则将所有HARQ过程推迟到下一个可用子帧。如果所选子集仅包含单一元素，将再延迟8ms，如图9.8所示，虚线和实线分别表示8ms和16ms后的子帧不可用重传。可用回程子帧越多，其分布越均匀，额外延迟越少。例如图9.9中所示，尽管子集仅包括8个可能值中的4个，2ms已是最低延迟。在后一种情况下，配置了每10ms最多6个回程子帧。根据配置的回程子帧数，在Un链路上并行运行的HARQ过程数要少于8个：在图9.8中一个单一过程，图9.9中三个过程，由三个双箭头指示，在大多数情况下，最大回程配置为6个。

图9.8　回程链路中最小回程配置的重传

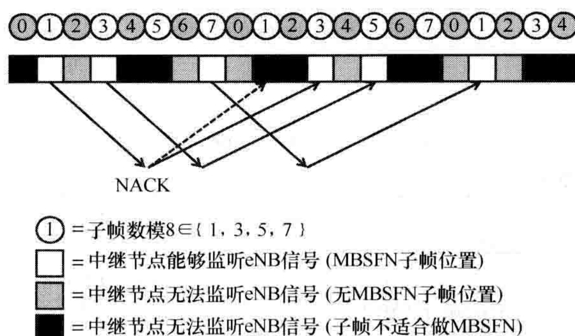


图 9.9 回程链路中配置一半可用资源的重传

使用中继时终端到终端的延时比 UE 与 eNB 直连时的时延要稍微高一些。

① 两个空口传输，两个调度和两个过程时延构成总时延。

② 两个无线链路，使得重传可能性提高。这个因素被部分补偿：可假设中继链路是静态稳定的，因此通常有足够的接入容量允许一些额外的传输。

③ 若 8ms 周期后 MBSFN 子帧不可用，将有更高的重传时延。

LTE 最佳回程时间大概是 10ms。中继连接大约会使这个延迟加倍。但在实际应用中，因为还有除无线外的其他因素影响时延，如传输网和因特网延迟，对终端用户的影响并没有那么明显。此外，中继允许小区边缘用户更高的吞吐量，部分补偿了额外时延，因此对一个给定的数据包可完成更快的传输。

9.3.4 中继与中继器相比

长期以来，在移动网络中使用 RF 中继器。RF 中继器不使用任何编解码功能，只是放大整个 RF 带宽。RF 中继器为隔离区域提供覆盖，例如覆盖地下区域。因为 RF 中继器也放大干扰，户外使用 RF 中继器时会出现更多的问题。

中继节点首先从 eNB 中解调出消息，然后用优化的包调度对 UE 的传输进行编码。中继节点只发送必须消息，使得干扰不被放大。中继的另一个好处是 eNB 和中继节点之间的传输可使用更高的传输速度。eNB 的资源可快速的重配给其他 UE 或中继节点。若是 RF 中继器，在两个链路中必须使用相同的数据传输速率。中继还有一个好处，因为在不同方向上或时域分离、或频域分离，在它自己的传输上没有干扰问题。RF 中继器需要细致的规划和天线的定位来避免干扰问题。两者的不同之处在表 9.1 和图 9.10 中概括。

表9.1　中继和RF中继器的对比

	3GPP Release 10 relay	RF repeater
译码和编码	是	否，放大射频信号同时放大干扰
包调度	是	否
传输和接收避免干扰	是，在时域（带内）或者频域（带外）	需要准确的天线规划
两个链路中使用不同传输速度可能性	是	否

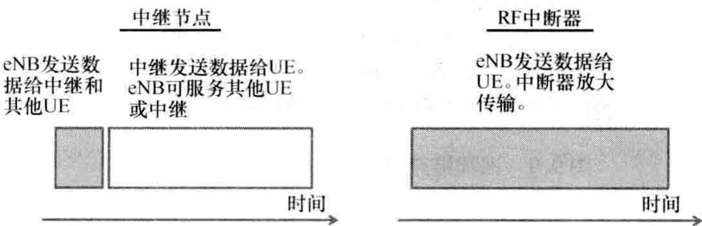


图9.10　带内中继与RF中继相比

在图9.11中比较了中继节点和RF中继频谱效率[11]。它们部署在基站小区边缘，以提高用户吞吐量（部署在下面的图9.22中展示）。基站传输功率为46dBm，中继或RF中继的传输功率为30dBm。假设UE在同一位置，有中继或RF中继情况下无线回程链路要比直接链路好16dB。RF中继发送和接收天线之间隔离良好的话，环路干扰的SNR假设为-5dB。图9.11显示部署至少5个中继节点，中继或RF中继与UE间链路的每个质量指标都胜过3个中继节点的典型情况。我们可以进一步观察到如果接入链路SNR良好（UE接近中继），从中继节点的增益是最高的；而如果接入SNR较低（UE远离中继节点）且只有一个中继节点，与只部署eNB相比这个中继节点会降低小区边缘频谱效率。没有中继的参考小区边缘频谱效率是（0.7b/s/Hz）；这种情况下UE应当直接移交给eNB。

如图9.10所示，使用更多的中继节点会提高频谱效率，因为中继与UE的链路可同时运行，而RF中继做不到这一点。

9.3.5　TD-LTE中的中继

中继同样可以支持所谓的时间分集版本的LTE（TD-LTE）。对于带内中继，上行和下行链路，接入和回程链路都可使用同样的频率。表9.2中列出了配置选项。例如，使用TDD配置1的中继配置2，这个配置将4个子帧分配给下行链路，4个子帧分配给上行链路，2个用于切换。切换子帧也可部分用于数据传输；一般大部分切换子帧用于下行链路。中继配置2使用3个回程子帧和5个接入子帧。切换子帧同样应用于在接入链路中。TDD中上行和下行链路的分割在所有小区中必须相同。只要中继节点的干扰不会造成问题，回程和接入链路的分割在不同中继是可以

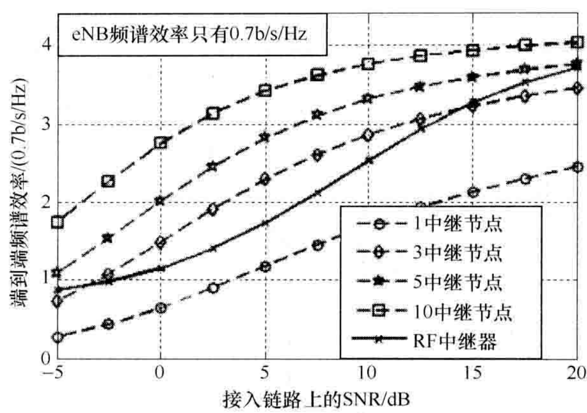


图9.11　中继节点和RF中继器的端到端频谱效率，只部署eNB的小区边缘频谱效率为0.7bit/s/Hz

独立修改的，见9.5节。

9.4　结构和协议

当中继标准化工作开始时，3GPP在参考文献［2］中收集了候选的结构。随后在参考文献［5］［6］中增强了RRC和PDCP协议，在参考文献［7］［8］中增强了S1和X2接口。这些增强措施将在本章后续部分解释。

9.4.1　有中继节点的子帧结构

已定义了三种类型中继节点：

① 需要回程链路中继子帧配置的带内中继；

② 无需中继子帧配置的带外中继；

③ 回程和接入天线之间有足够隔离度，因此无需中继子帧配置的带内中继。

表9.2　TD-LTE中继的配置选项

eNB-中继配置	TDD	子帧数量									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	d	s	u	u	D	d	s	u	U	d
1		d	s	u	U	d	d	s	u	u	D
2		d	s	u	u	D	d	s	u	U	D
3		d	s	u	U	D	d	s	u	u	D
4		d	s	u	U	D	d	s	u	U	D

（续）

eNB-中继配置	TDD	子帧数量									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	2	d	s	U	d	d	d	s	u	D	d
6		d	s	u	D	d	d	s	U	d	d
7		d	s	U	d	D	d	s	u	D	d
8		d	s	u	D	d	d	s	U	d	D
9		d	s	U	D	D	d	s	u	D	d
10		d	s	u	D	d	d	s	U	D	D
11	3	d	s	u	U	u	d	d	D	d	D
12		d	s	u	U	u	d	d	D	D	D
13	4	d	s	u	U	d	d	d	d	d	D
14		d	s	u	U	d	d	d	D	d	D
15		d	s	u	U	d	d	d	d	D	D
16		d	s	u	U	d	d	d	D	D	D
17		d	s	u	U	D	d	d	D	D	D
18	6	d	s	u	u	U	d	s	u	u	D

d = 接入链路的下行链路　u = 接入链路的上行链路

D = 回程链路的下行链路　U = 回程链路的上行链路

中继节点需要向 eNB 指明它是一个中继（为了与 UE 区分开），正如图 9.12 中所示，需要 RRC 连接建立完成消息中的中继子帧配置。eNB 通过系统信息升级一起的专用信令进行中继子帧配置。因为中继节点对于它的 UE 来说是一个 eNB 的角色，所以中继节点并不能像一个普通 UE 那样应用普通的系统信息获得程序，它需要为它的 UE 来执行系统信息获得程序。只需要通过专用 RRC 信令提供给中继节点 SIB1 和 SIB2，给中继节点的系统信息可与 eNB 广播给 UE 的不同。中继节点不适用于通过专用信令存储系统信息的系统信息有效定时器。

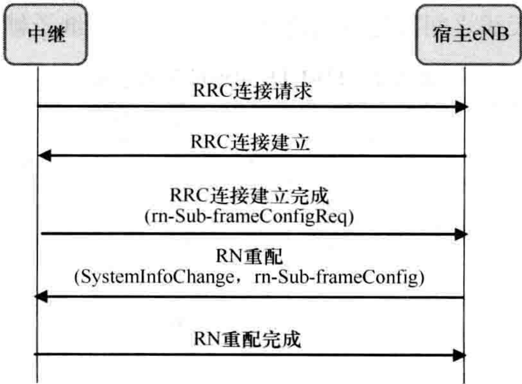


图 9.12　中继节点指示，中继节点子帧配置需求和中继节点重配

9.4.2　中继节点的承载用法

中继节点的操作和维护以及终止信令在中继节点的 S1/X2 控制信令需要用 Un 承载运输。在 Un 接口使用区分服务质量（Quality of Service，QoS）的 QoS 等级标示（QoS Class Identifier，QCI）也用于 S1 接口。QCI 值和其优先级由参考文献［12］给出。操作和维护信令可以使用 QCI7，它是一个无保证 QoS 等级。

S1/X2 控制信令可使用 QCI5，这是最高优先级的承载，也用于 IMS 信令。回程和接入链路承载间的映射由中继节点控制。承载结构的示例如图 9.13 所示。

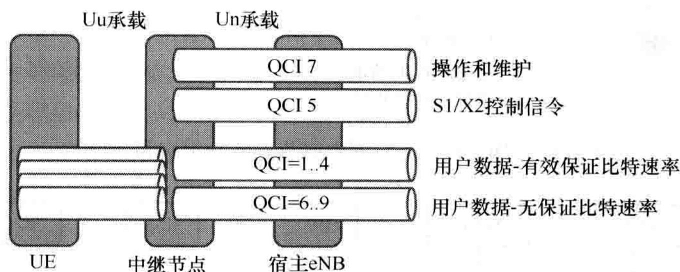


图 9.13　中继节点的承载

9.4.3　Un 接口中的数据包报头结构

由于 GTP 隧道的存在，因此中继节点和 eNB 间的接口在用户平面载荷顶端需要额外开销。对回程链路来说，只用了现有报头压缩，但没有进一步增强。这意味着外面的报头可以压缩，但内部的不可以。另外，还会产生 IP 报头的额外开销，但很小，对典型网络应用来说不足 10%。如果一大部分流量的使用如 VoIP 连接的小数据包，报头压缩将是有益的。用户数据报协议（User Datagram Protocol，UDP）和实时控制协议（Real Time Protocol，RTP）如 VoIP 的不同接口的数据包结构如图 9.14 所示。

9.4.4　附加过程

当在站址安装一个新的中继节点时，它将自动加入网络。这个附加过程包括两步。第一步中继节点创建与 eNB 的 RRC 连接，并把自己作为 UE。在这一步中，中继节点从操作、管理和维护（Operation Administration Maintenance，OAM）获得允许连接的 eNB 列表，然后与网络分离。在第二步中，中继节点从第一步获得的列表中选择连接 eNB，这可以保证选中的 eNB 确实可以支持中继，而不会是 Release 8 和 9 eNB 中的情况。附加过程如图 9.15 所示。

在第二步中，中继节点需要通知 eNB 连接的是个中继节点，因为 eNB 需要选择一个可支持中继节点的 MME，该 MME 可选择与 eNB 相关的 S-/P-GW。MME 从

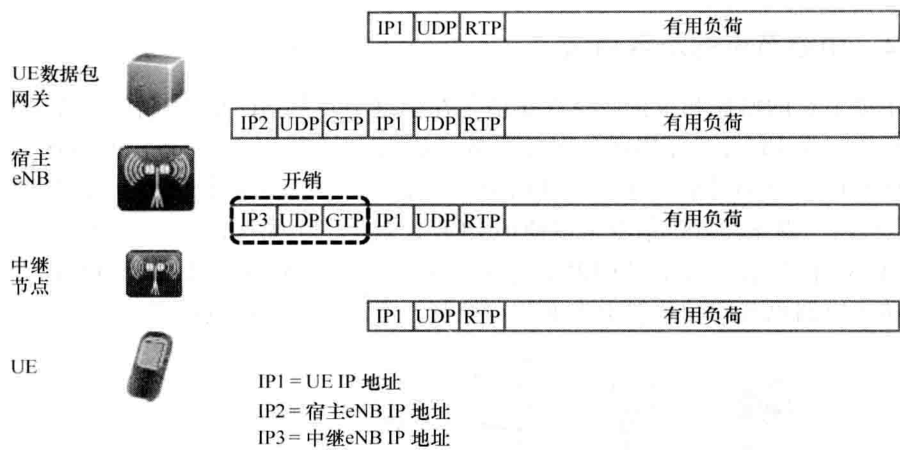


图 9.14　UDP/RTP 情况下中继节点的数据包报头结构

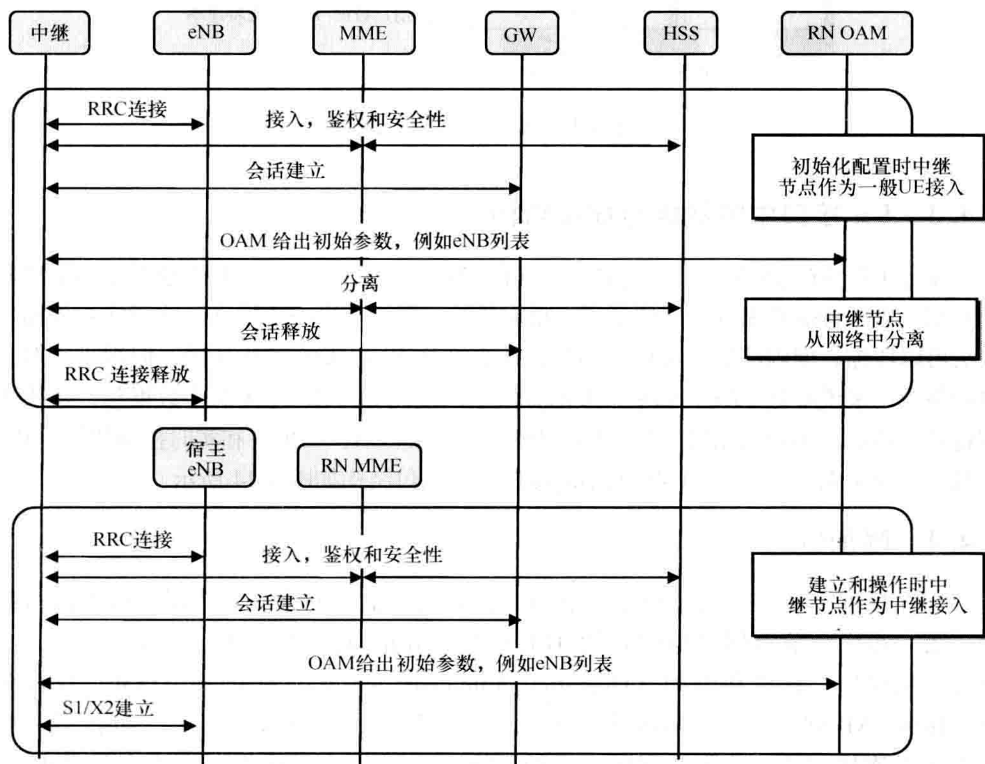


图 9.15　中继节点接入过程

归属用户服务器检索订阅数据，确定中继节点允许连接。反之则释放 RRC 连接，以防止非法中继接入网络。

9.4.5 切换

中继节点间的切换可在一个eNB里或两个eNB间完成，见图9.16。中继节点的切换类似于两个扇区的切换（在同一个eNB里的情况）或两个eNB间的切换（eNB间的情况）。在切换过程中，到达源中继节点的下行链路数据被转发到目标中继节点，此过程可完成无包损失的无缝切换。为了方便起见，在Release 10中转发不仅可应用于eNB间的情况，还可应用于eNB内的情况。

Release 10只支持固定的中继节点，中继节点的移动性在Release 11中有所体现。

9.4.6 自治邻区关系

中继节点的部署可能会产生新的邻区关系，因此需要建立新的X2接口。图9.17中描述了一个例子。在这个示例中没有中继节点，eNB1建立了与eNB2和eNB3的X2接口，但是与eNB4没有覆盖重叠区域，因此无X2接口，取而代之的是一个覆盖空白区域。为了覆盖到这个空白区域，部署了一个新的中继节点并连接到eNB1。这个中继节点与eNB4有重叠覆盖区域，因此，在中继节点和eNB4之间需要X2接口。因此中继节点在接入过程的第二步与eNB1建立一个X2接口，这个新的X2接口是通过eNB1建立的，需要eNB1和eNB4之间的X2接口建立。因此，中继节点和eNB4间的X2接口的可用性取决于eNB1和eNB4之间X2接口的可用性，并在中继节点OAM配置供中继节点和eNB4的UE切换使用的X2接口。如果中继节点未被允许使用X2接口，则将使用S1接口。

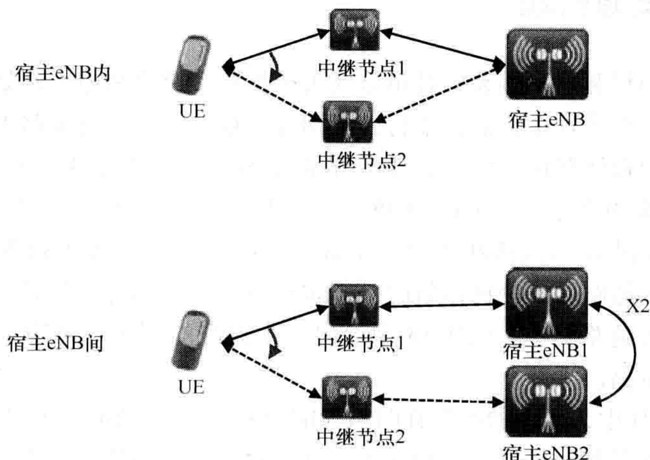


图9.16　eNB内和eNB间的切换案例

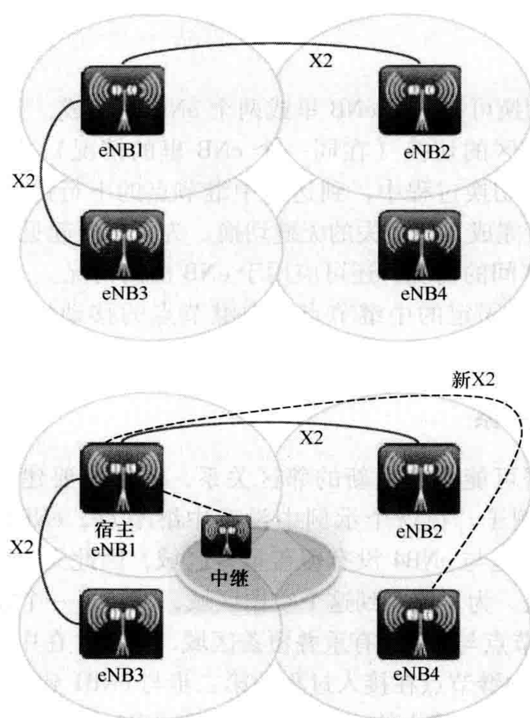


图 9.17 宿主 eNB1 新建的 X2 接口

9.5 无线资源管理

带内中继回程和接入链路的容量分区可根据容量要求调整，例如依据回程链路上中继的数量。为了这个目的，下行链路回程传输的一组下行链路中继节点子帧是可调的。上行回程链路传输的一组上行链路中继节点子帧是来自使用 HARQ 时序关系的下行链路中继节点子帧。中继节点子帧的资源分配由 eNB 控制，且使用 RRC 信令来通知中继节点这些资源的情况。中继节点在接收子帧重配后立刻激活它，回程和接入链路的子帧可以暂时处于未对齐状态，因为回程链路新的子帧配置应用得要比接入链路早些。图 9.18 中给出一个重配的例子。第四个子帧从接入链路重配到回程链路。

在 LTE FDD 中，eNB 的操作在时域无需同步，只有 TDD 操作需要时间上的同步，因为 MBMS 传输可能需要本地服务。如果这两个中继连接到不同的 eNB，一个中继在进行接入链路传输的同时另一个中继在回程链路接收数据。即使相邻的 eNB 同步，两个中继之间仍可使用不同的子帧配置来完成这个接口方案。下行链路方案

在图9.19中展示，中继节点1传输数据给UE，同时中继节点2从eNB接收数据。如果中继节点间的路损比较低，例如视距情况下，可能会造成剧烈的干扰。上行链路会发生类似干扰情况。当中继节点2传输数据给eNB并对中继节点1在它的接入链路上的接收造成干扰。

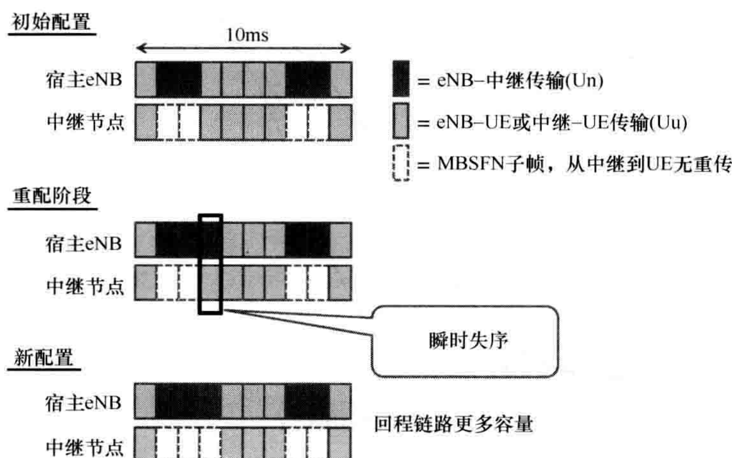


图9.18 回程和接入链路的重配能力

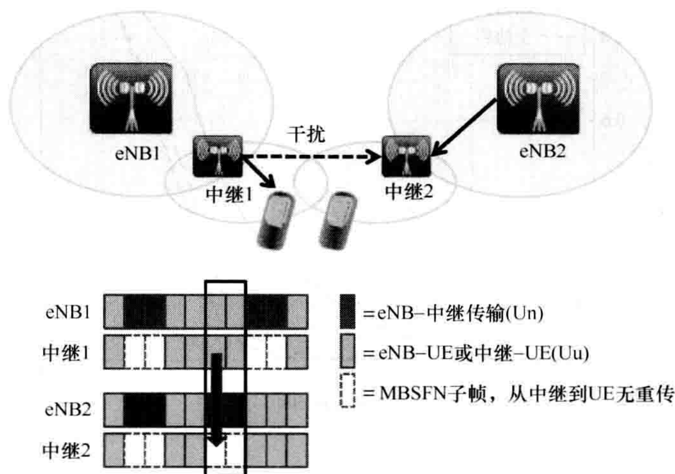


图9.19 两个中继节点间下行链路干扰方案

与每eNB部署4个中继节点方案相比，每eNB部署10个中继节点干扰会更剧烈，且与站间距离500m相比1732m更加严重。在图9.20中比较了部署1732m eNB和10个中继节点不同的协调策略。全面协调是指相邻eNB同步的情况下，采

用相同的中继节点的子帧配置。站点内的协调是指同一 eNB 小区采用相同中继节点配置的情况。可以清楚看到天线方向图来自相邻 eNB 的中继节点的输出干扰，因此仅在站点内需要协调，无需 eNB 之间的同步。

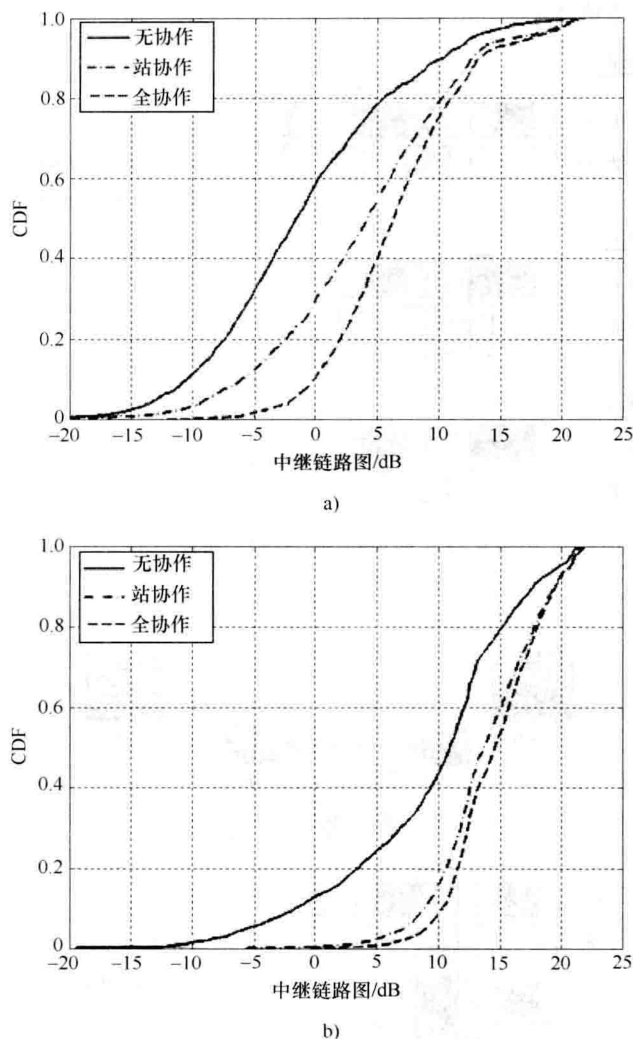


图 9.20 回程链路全向性的中继链路图

a）方向性 b）回程链路和中继节点子帧配置不同的协作等级

与 eNB 相比，中继节点只支持一个较低的下行链路最大传输功率，因此覆盖范围更小，通常只用于几个 UE。因为中继节点小区处于低负载而 eNB 小区处于高负载状态，所以无线资源利用率较低。通过偏调小区选择和切换阈值，eNB 和中继

节点的小区边界是可调的，如图 9.21 所示。从 eNB 切换到中继的 UE 有更多的可用无线资源来补偿低 SINR[14][15]。更多关于宏小区和微小区的同信道部署讨论细节见第 8 章。

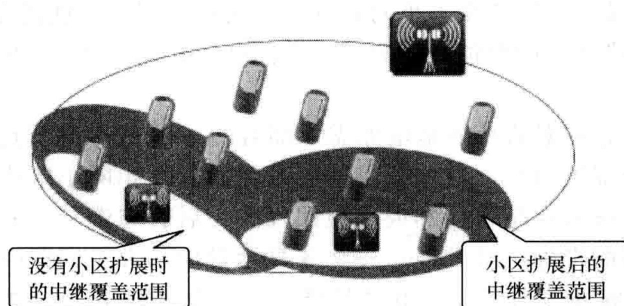


图 9.21 中继节点小区扩展

9.6 覆盖与容量

考虑两种部署方案，4 个中继节点单层部署在小区边缘，10 个中继节点分两层部署在小区边缘，如图 9.22 所示。假设 eNB 的功率级别是 46dBm，中继节点的功率级别是 30dBm。

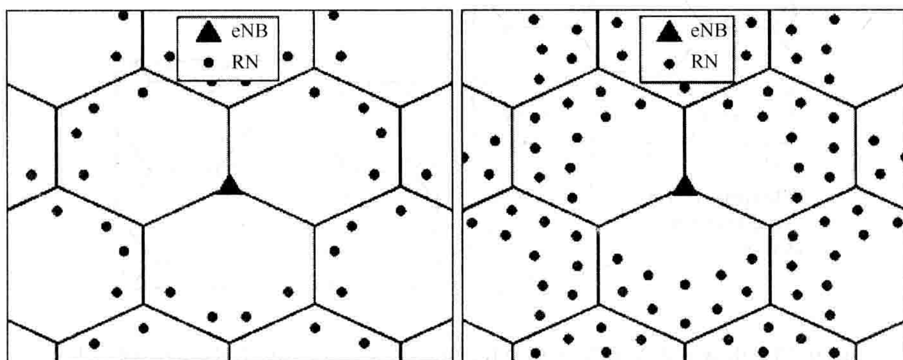


图 9.22 一层（4 中继）或两层（10 中继）的中继节点部署

9.6.1 覆盖增益

中继节点部署在 Release 10 中主要是用来扩展覆盖范围的，中继最好部署在（或接近）用户吞吐量小的小区边缘，在这些 UE 附近部署中继，会极大提升网络

性能和覆盖范围。

现有的 eNB 部署并不满足小区边缘用户的吞吐量需求（图 9.23a），传统的解决方式包括部署更多的 eNB 以增加密度（图 9.23b）。另一种可替代方案是在小区边缘部署如微基站和中继节点等小的节点，小区边缘用户的性能提升与增加 eNB 相同。当小区边缘用户的性能相同时，定义图 9.23b 和图 9.23c 的方案为等性能方案[16]。

这两个等性能方案的特征是增加需要部署的 eNB 或中继节点的数目。运营商可以决定是否部署节点。这些数目的关系叫做提供相同小区边缘吞吐量的交换比率。认为中继节点是带内的或理想回程的，后者与微基站的部署或假定回程链路足够频谱的带外中继类似。表 9.3 显示带内和理想回程的中继节点部署与站间距 500m 额外多出一个 eNB 的性能相似。站间距 1732m 的小区边缘性能情况也一样，部署带内或理想回程中继，实际上与微小区一样高效，且有无需单独传输方案的优势[17]。

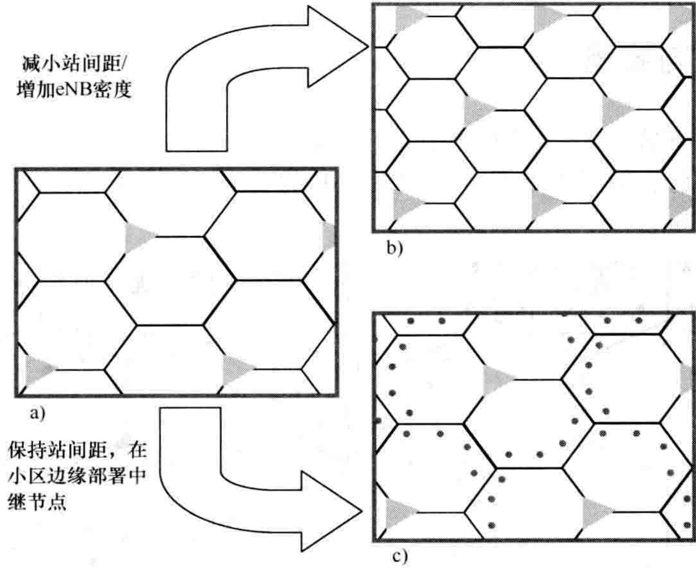


图 9.23　中继节点部署或增加 eNB 密度，以满足小区边缘用户的性能需求

表 9.3 eNB 和带内或理想回程的中继节点的交换比

站间距（ISD）	eNB 和中继间的交换比	
	理想回程情况	带内回程情况
500m	15	18
1732m	24	24

9.6.2 用户吞吐量增益

我们分析了下行和上行链路部署中继的小区边缘和平均小区性能。结果同只部署 eNB，站间距 500m 和 1732m 上[15],[22]-[27]下行[14],[18]-[21]链路的情况。

从图 9.24 中可观察到中继节点的部署尤其针对覆盖较差的情况，也就是说 1732m 站间距情况下它们表现出更高的小区边缘吞吐量增益。中继节点也可用来增加容量到一个指定的级别，直到回程链路成为瓶颈，阻碍更多的吞吐量增益。进一步，中继节点上行链路的性能比下行链路要高，因为在下行链路中继节点与 eNB 相比功率较低，而在上行链路 UE 无论连接的是 eNB 还是一个中继节点，都具有相同的最大功率。可以通过偏置小区选择和切换阀值来平衡 eNB 和中继节点的负载，中继节点小区扩展来得到小区边缘用户的额外增益，以增加中继覆盖范围。如柱状图 9.24 所示，小区边缘的吞吐量增加。

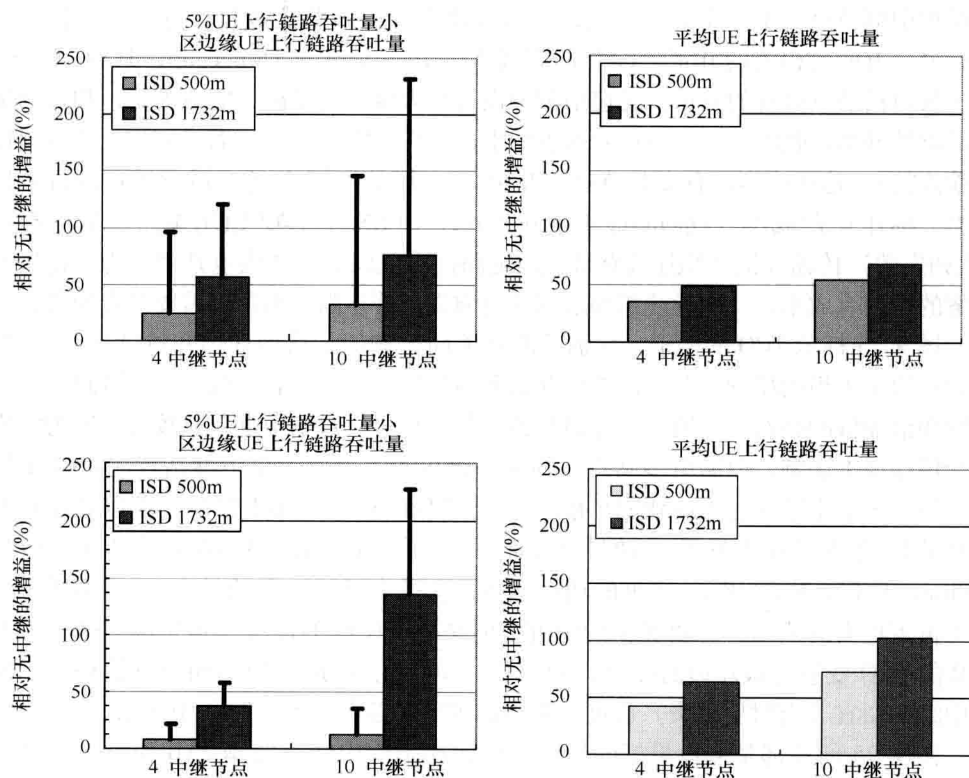


图 9.24 上、下行链路小区边缘和平均小区吞吐量，柱状图表现了小区边缘吞吐量的边界扩展影响。注意 5% 上行链路吞吐量柱状图 y 坐标刻度不同

假设中继回程子帧配置如表 9.4 所示，结果如上。中继子帧数目的选择依据小区边缘性能的最佳化（或相当于 5% UE 吞吐量）。

表 9.4 不同方案中继回程子帧的配置

方　　案	扇区区域与中继覆盖区域相比	中继子帧数目
ISD 500m，4 中继节点	29%	2
ISD 500m，10 中继节点	45%	4
ISD 1732m，4 中继节点	44%	4
ISD 1732m，10 中继节点	67%	6

9.6.3 开销分析

运营商有两种选择来增加小区边缘用户体验：增加额外的 eNB 或如 9.6.1 节所述增加中继节点。哪一个开销更省，一方面由需要的新节点数目，也就是交换比决定；另一方面由相关的开销，即总拥有成本（Total Cost of Ownership，TCO）决定，它不仅包括节点自身的开销，还包括辅助设备如天线杆、线缆、电池等等，和计划部署的额外开销，收购站点、开设新站点的平民工作、安装节点（若是 eNB，还要提供传输连接）。这些成本，有安装节点的开销（一次性成本），还有运营节点的日常性成本，称作运营成本（Operating Expenditures，OPEX），包括租用站点，节点维护（比如失效）传输开销（租用线路或微波链路许可证成本）和供电开销。为了比较各方案的总拥有成本，一次性开销加运营开销乘以部署年限，再乘以需要节点的数目。

图 9.25 标示 TCO 的例子，区别了两种不同方案的一次性开销和持续运营开销，例如左边由于租用昂贵线路的低站点开销和高传输开销，和右边假定微波链路和所需微波频谱廉价的高站点开销和低传输开销。前一种假设对于中继节点较好，因为它们不受传输成本影响，但需更多站点。因为中继更小，所以一个中继站点比 eNB 更便宜，但是多个中继的总租站费用可能比一个 eNB 的租站费用更昂贵。所以高站点开销和低传输开销对中继是一种最坏的假设。进一步假设不同的中继功率，包括 24dBm，33dBm 和 38dBm，中继的功率越高，交换率越低（在括号中），因为单个中继可覆盖更大的范围，需要更少的中继，但是每个中继的设备开销更高。两种方案 eNB 的 TCO 变量（最左边的柱形）归一化为 100%，因此图中不同中继的列表示部署中继的便宜（有时更昂贵）程度。更多的细节在参考文献［28］中介绍。

图 9.25 的顶部是假设最好的情况，任何功率的中继都要比 eNB 便宜，并且功率更大的中继比低功率中继更有节能潜力，因为中继数目需求更少。这个情况下运营开销与一次性开销相当。

但最坏的情况如图 9.25 底部所示，低功率中继甚至比 eNB 更昂贵，主要是由于高的站点开销需要乘以中继数目，使得运营开销与一次性开销相比显著。但对于

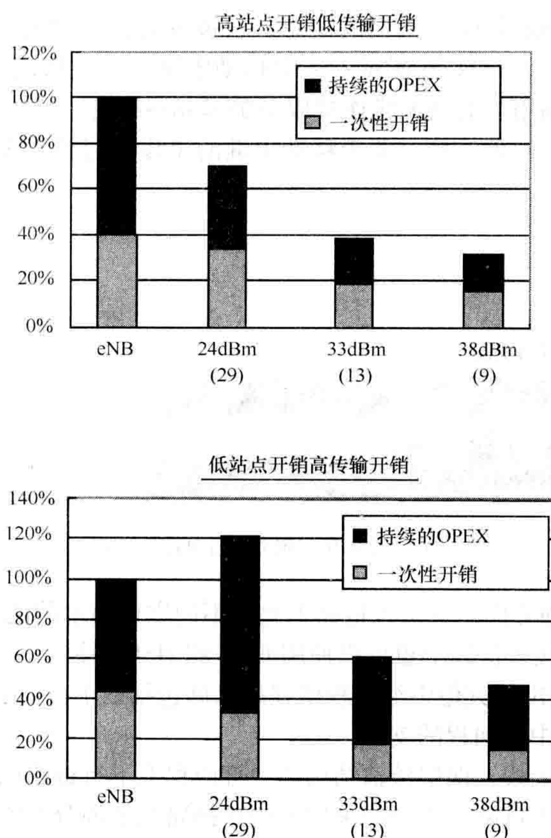


图9.25 低站点开销、高传输开销（上面）和高站点开销、低传输开销（下面）的eNB和不同功率中继的5年TCO开销对比

高功率中继，依旧节省明显。

这些结果以中继节点可有效部署的覆盖受限情况为前提假设。一旦网络变为容量受限，中继的效果将较为有限，因为回程链路此时成为瓶颈。

9.7 中继增强

3GPP Release 11增强了中继的移动功能。一个应用的例子是火车，目前，世界范围内部署的高速火车上的移动中UE均有大量的服务需求，这种场景对传统移动网络具有挑战性。车厢有窗户覆盖，隔离良好，因此带来很高的穿透损耗，范围在20~30dB。高速产生多普勒频移，引起频率和信道估计错误。进一步，由于错误或延迟的邻区测量和过多的信令，连接态的UE切换成功比例与低速UE相比较更低，而且，频繁的小区重选使得这些UE也更加耗电。

移动中继最近越来越受到人们的注意，它被视为是高速火车[29]上种种 UE 问题的一种解决方案，如图 9.26 所示。一个移动中继安装在移动交通工具上、通过一根室内天线为终端用户提供无线连接服务的基站/接入点。通过一根室外天线提供到陆地网络的无线回程连接。关于移动中继的工作项目将在 3GPP Release 11 之后开始标准化。

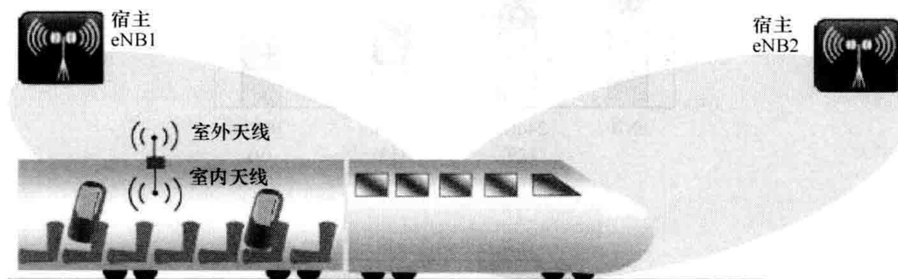


图 9.26 安装在一辆货车上的移动中继

一个潜在的增强方向是在接入链路上允许不同空口技术的能力：无线回程链路使用 LTE 空口，而接入链路上也可以使用 GSM 和 HSPA 接口。

Release 11 中提出的其他中继回程增强的措施包括以下方向：

① 载波聚合对中继回程的支持；

② 支持 8 发送天线，四层传输结构的中继回程上下行链路的改进；

③ 通过考虑接入链路资源分配来增强回程链路上资源分配的有效措施。

9.8 小结

中继节点目标在于提高小区边缘用户和其他无线网络覆盖较差用户的（包括室内用户）数据速率。中继在 3GPP Release 10 中定义并向后兼容 Release 8 终端接入。从终端角度来看，中继节点就像一个 eNB。中继节点支持全部 eNB 功能，包括编码、解码和包调度。中继节点的接入链路可使用与回程链路相同频率（带内）或不同频率（带外）。带内中继的接入和回程链路是时分的，从而避免两条链路的干扰问题。因此从干扰角度看，中继节点比传统射频中继器更加易于部署。中介节点的接入和回程链路的资源分配可根据容量需求进行调整。

仿真显示，中继节点确实可以提高小区边缘用户数据速率。当中继节点靠近 UE 部署时，可提供良好的信噪比，此时的效益最高。若回程链路质量良好，系统容量也将提升，这是由于中继节点允许最小化回程的容量分配从而提高接入链路和 eNB 服务 UE 的容量。如果传统 eNB 高传输开销，低站点开销，并且网络覆盖受限，那么此时中继节点的优势将最为明显。

参考文献

1. 3GPP TR 36.814 (March 2010) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9).
2. 3GPP TR 36.806 (March 2010) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Relay architectures for E-UTRA (LTE-Advanced).
3. 3GPP TS 36.300 (March 2012) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10).
4. 3GPP TS 36.216 (September 2011) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer for relaying operation.
5. 3GPP TS 36.331 (March 2012) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 10).
6. 3GPP TS 36.323 (March 2011) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification (Release 10).
7. 3GPP TS 36.413 (March 2012) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); S1 Application Protocol (S1AP) (Release 10).
8. 3GPP TS 36.423 (March 2012) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); X2 application protocol (X2AP) (Release 10).
9. 3GPP TR 36.826 (March 2012) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Relay radio transmission and reception (Release 9).
10. Góra, J. and Redana, S. (2011) In-Band and out-band relaying configurations for dual-carrier LTE-advanced system. Proceedings IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC).
11. Bou Saleh, A., Redana, S., Raaf, B. *et al.* (2009) Performance of amplify-and-forward and decode-and-forward relays in LTE-advanced. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Fall.
12. Holma, H. and Toskala, A. (2011) *LTE for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
13. Bou Saleh, A., Bulakci, Ö., Redana, S. *et al.* (2011) A divide-and-conquer approach to mitigate relay-to-relay interference, Proceedings IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September.
14. Bou Saleh, A., Bulakci, Ö., Redana, S. *et al.* (2010) Enhancing LTE-advanced relay deployments via Biasing in cell selection and handover decision. Proceedings IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC).
15. Bulakci, Ö., Bou Saleh, A., Redana, S. *et al.* (2010) Enhancing LTE-Advanced Relay Deployments via Relay Cell Extension. International OFDM-Workshop (InOWo).
16. Beniero, T., Redana, S., Raaf, B. and Hämäläinen, J. (2009) Effect of relaying on coverage in 3GPP LTE. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring.
17. Bou Saleh, A., Redana, S., Raaf, B. and Hämäläinen, J. (2009) Comparison of relay and Pico eNB deployments in LTE-advanced. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Fall.
18. Bou Saleh, A., Redana, S., Raaf, B. and Hämäläinen, J. (2010) On the coverage extension and capacity enhancement of inband relay deployments in LTE-advanced networks. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, doi: 10.1155/2010/894846.
19. Bou Saleh, A., Bulakci, Ö., Ren, Z. *et al.* (2011) Resource Sharing in Relay-enhanced 4G Networks - Downlink Performance Evaluation, European Wireless Conference (EW).
20. Bou Saleh, A., Bulakci, Ö., Redana, S. *et al.* (2011) Addressing Radio Resource Management Challenges in LTE-Advanced Relay Networks - Downlink Study, VDE 16. ITG Workshop on Mobile Communications.
21. Ren, Z., Bou Saleh, A., Bulakci, Ö. *et al.* (2012) Joint Interference Coordination and Relay Cell Expansion in LTE-Advanced Networks, IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC).
22. Bulakci, Ö., Redana, S., Raaf, B. and Hämäläinen, J. (2010) System optimization in relay enhanced LTE-advanced networks via uplink power control. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring.
23. Bulakci, Ö., Redana, S., Raaf, B. and Hämäläinen, J. (2011) Impact of power control optimization on the system performance of relay based LTE-advanced heterogeneous networks. *Journal of Communications and Networks*, **13** (4), 345–359.

24. Bulakci, Ö., Bou Saleh, A., Ren, Z. *et al.* (2011) Two-step Resource Sharing and Uplink Power Control Optimization in LTE-Advanced Relay Networks, International Workshop on. Multi-Carrier Systems & Solutions (MC-SS).
25. Bulakci, Ö., Bou Saleh, A., Redana, S. *et al.* (2011) Uplink Radio Resource Management Challenges in LTE-Advanced Relay Networks, VDE 16. ITG Workshop on Mobile Communications.
26. Bulakci, Ö., Bou Saleh, A., Redana, S. *et al.* (2011) Flexible Backhaul Resource Sharing and Uplink Power Control Optimization in LTE-Advanced Relay Networks, IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Fall.
27. Bulakci, Ö., Awada, A., Bou Saleh, A. *et al.* (2011) Joint optimization of uplink power control parameters in LTE-Advanced relay networks, 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC).
28. Lang, E., Redana, S. and Raaf, B. (2009) Business impact of relay deployment for coverage extension in 3GPP LTE-advanced, international workshop on LTE evolution. IEEE International Communications Conference (ICC).
29. RP-111377 (2011) Mobile Relay for E-UTRA, 3GPP TSG RAN#53, Fukuoka, Japan, September 13–16.
30. RP-111075 (2011) Improvements to LTE Relay Backhaul, 3GPP TSG RAN#53, Fukuoka, Japan, September 13–16.

第 10 章　SON

10.1　简介

SON（自组织网络）功能的目标是改善网络质量和容量，以简化网络操作。设计 SON 算法是用于提供更好的终端用户性能，更低的操作成本和更高的网络利用率。SON 的需求是伴随着 LTE 出现的，因为 LTE 在现有的 GSM 和 HSPA 网络上引入一个叠加的无线网络。LTE 和异构网络也引入了更多的基站。与此同时最小化网络操作费用。SON 是实现这些目标的一种有效手段。SON 功能在 3GPP 的 LTE 无线网络中引入，起始于 Release 8，并在后续的 3GPP 版本中能力得到增强。本章总结了自组织网络的功能，并聚焦在最新的协议功能。

10.2　3GPP 版本中的 SON 路线图

3GPP 中已经规范了许多 SON 用例用于自配置、自优化和自愈合的范畴。一般而言，自配置用例在早期提供基本网络覆盖时是非常重要的，然而自优化和自愈合考虑网络质量和能力，更与网络使用量的提升相关。

SON 用例由 3GPP 的 3 个工作组根据各自的职责进行定义：RAN2，RAN3 和 SA5。RAN2 只解决一个用例：最小化路测，其他用例由 RAN3 和 SA5 来定义。

自配置功能主要在 3GPP Release 8 中标准化，包括小区物理小区标识符（Identity，ID）的自配置和自动邻居关系功能，自优化是 3GPP Release 9 的核心内容之一，其中重点包括移动性负载均衡（Mobility Load Balancing，MLB），移动鲁棒性优化（Mobility Robustness，MRO）和 RACH 优化。SA5 处理自愈合功能相关用例：小区中断补偿（Cell Outage Compensation，COC）是 3GPP Release 10 中的一部分。Release 10 在 2010 年开始标准化，并进行 MRO 和 MLB 最小化路测（Minimization of Drive Testing，MDT）的增强。

3GPP 的 Release 11 的 SON 主要聚焦在问题场景，即跨网 MRO、异构网络 MRO 和最小化乒乓事件的 MRO 功能；减少乒乓能够减少不必要的移动事件（信令）和降低 UE 的功耗。Release 11 MDT 的主要焦点是 QoS 验证。

节能（Energy Saving，ES）是在 Intra-LTE Release 9 开始标准化的。3GPP Release 10 中奖 ES 研究项目扩展更多的场景，例如多 RAT 场景；此外还讨论了对处

于节能状态的小区的唤醒机制。节能 WI 是在 3GPP Release 11 标准化。

3GPP 中的 SON 概述如图 10.1 中所述，更多的用例细节讨论见参考文献［1］中的第 3 章。



图 10.1　3GPP 中 SON 功能的演进路线

LTE-Advanced 的功能在 Release 10 引入：包括载波聚合，上行链路和下行链路 MIMO 增强，中继节点和异构网络的不同层小区之间互操作的优化。同时规定了中继节点的自配置和自动邻居关系功能。由于对于宏网络的 SON 功能用例也同样适用于微小区，因此 Release 11 的 SON 增强特别定义了多层网络场景，从而使 SON 功能更好的应用于异构网络。

10.3 自优化

10.3.1 移动鲁棒性优化

移动鲁棒性优化的总任务是保证良好的移动性，即在连接模式下能够适当地切换。这可以通过：

（1）最小化无线链路失败（Radio Link Failure，RLF）和呼叫掉话。在许多情况下，一个连接可以在掉话之前，RLF 之后重新建立。更糟的情况是一个移动性问题可能导致呼叫掉话。连接重建唯一可能在 LTE 内部，如果涉及另一个目标 RAT 的情况则不可能。如果可以承受暂时的质量退化的话，则可以通过核心网络的恢复

帮助保持 UE 服务。

（2）尽量减少不必要的切换和乒乓。乒乓是指在短时间内两个小区之间进行重复切换。不必要的切换和乒乓不会导致 RLF，但较多的切换将会导致网络资源的低效利用和用户吞吐量的下降，使 UE 感知受到影响。

在 Release 9 中 MRO 专为 LTE 设定（包括频率内和频率间），而 Release 10 解决了一些 RAT 间的挑战，如不必要的切换。完全的 Inter-RAT MRO 是 Release 11 的一个核心部分。深入的描述、应用场景和相关仿真可见参考文献 [1]。

MRO 的基本思路是在导致连接失败的移动配置中自动探测和纠正错误。这根据 Release 9 中规定的失败报告来实现，后被扩展到 Release 10 中。在 Release 9 中，大多数情况下不可能确定失败的原因，例如覆盖空洞、过晚或过早越区切换。MRO 假设大多数失败是由于移动性问题造成的，其提供了一个必要的框架来识别最相关的失败原因。

在定义 Release 9 中 MRO 时，大家公认的一个重要问题是过晚切换（在 10.3.1.1 节中定义）应该与覆盖空洞相区分，否则 MRO 会执行错误的纠正措施，这会使情况变得更糟。这种方法与 MRO 试图优化网络的思路一致，但是当然在覆盖空洞时，无论切换阈值如何改变，效果都不会更好。覆盖优化属于 MDT 的范畴（见 10.3.3 节）。

MRO 可以分为两个子任务，根本原因识别/评估和实际的移动参数校正。3GPP 主要涉及的是根本原因识别，参数校正通常是由供应商制定的。

10.3.1.1　Release 9 MRO

在 Release 10 给出 MRO 增强之前，Release 9 给出了简介。移动鲁棒性优化在参考文献 [2] 中进行了阐述，解决了三种类型的切换问题。

① 过晚切换；

② 过早切换；

③ 切换到错误小区。

过晚切换（图 10.2）：小区 A 发生连接失败，小区 B 则进行了连接重建。

过晚切换发生在当一个小区 A 的连接失败而切换并未进行初始化之前。UE 试图重新建立目标小区的无线连接（如果切换已初始化），或者在一个不是源小区的小区内（如果切换没有初始化）（小区 B）。图 10.2 显示了这种机制：UE 当从小区 A 移动到小区 B，并且发送一个重建立请求（RER，2）到小区 B。小区 B 需要包含 RLF 之前测量值的 RLF 报告（未在图中显示）。小区 B 通过 RLF 指示（3）通知小区 A 探测的 RLF 值。小区 A 意识到没有这个终端的最新切换，所以小区 A 知道已经产生了一个“过晚切换”的问题。

过早切换：一个成功的切换（图 10.3）从小区 B 到小区 A，然后小区 A 很快

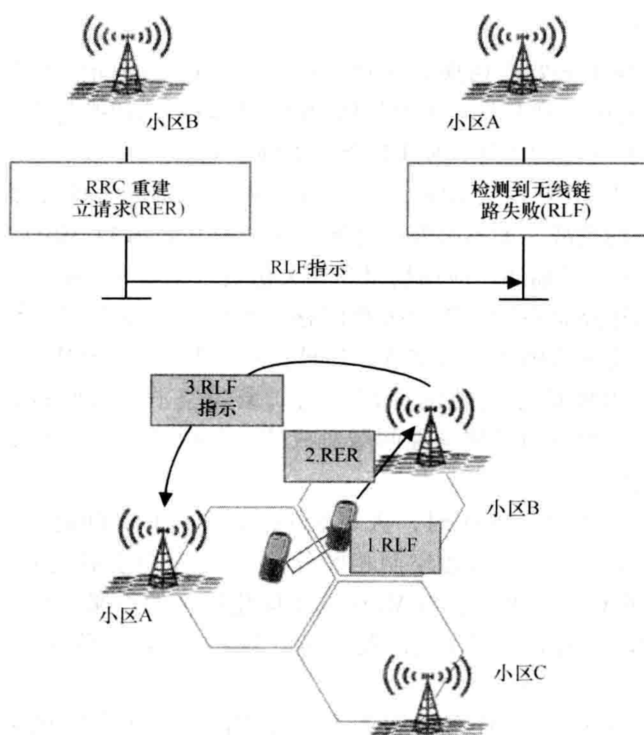


图 10.2　过晚切换检测

连接失败，并重新在小区 B 进行重建。

UE 从覆盖孤岛小区 A 中向小区 B 移动。其已经成功切换到小区 A（1），但是很快就发生了 RLF 并向小区 B 发送重建立请求（3）。小区 B 向小区 A 通过 RLF 指示（4）通知用户 RLF。小区 A 意到识有一个最新的切换使得没有机会来保存 UE 信息。所以它会通过切换报告通知小区 B（5），告知生成了一个过早切换。从小区 B 到小区 A 的连接也可能会失败。然而，由于该过程没有完成，小区 B 在识别的客户端请求重新建立时，不需要 eNB 间的信令。

切换到错误小区（如图 10.4）：一个成功的切换从小区 C 到小区 B，然后在小区 B 很快连接失败，并在小区 A 重建或者在程序中切换到小区 B 失败。切换到一个错误小区 B（即小区 C 应该执行到小区 B 的第一次切换，而不是到小区 A）。

UE 从小区 C 移动到小区 B，紧密地通过小区 A。它可以成功地切换到小区 A（1）但是很快遭受 RLF（2）或者如果程序没完成切换就结束。UE 发送重建立请求到小区 B（3）如果先前到小区 A 的切换完成了，小区 B 通过 RLF 指示值（4）通知小区 A。小区 A 意识到有一个最新的切换使得没有机会来保存 UE。所以它会通过切换报告通知小区 C，告知生成了一个错误小区的切换。如果先前到小区 A 的

切换没有完成，RLF 指示会直接发送到小区 C，可以进一步认识到这一问题（它将会有 UE 上下文）。

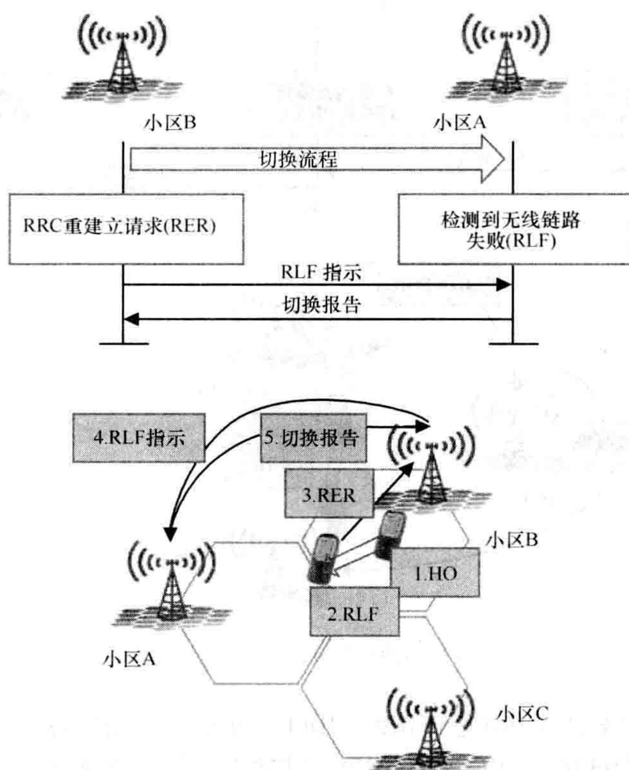


图 10.3 过早切换的信息流程图

乒乓问题在 Release 9 中没有得到解决。不过网络可以在切换中与 UE 上下文交换的 UE 历史中获得信息（Release 8 初步解决方案）。UE 历史包含在每一个小区内驻留的时间。对于乒乓："小区 A-小区 B-小区 A"，UE 历史将会告知小区 A，UE 已经在不久前进入小区 A。请注意小区 A 将不能识别 UE，因为以前的小区无线网络临时标识（Rodio Network Temporary Identifier，RNTI）丢失。

10.3.1.2 Release 10 MRO

在 Release 9 中定义的 MRO 解决方案受限于 UE 成功重建 RRC 连接，并且能够发送包含测量消息的 RLF 报告到 eNB。如果重建立程序不成功，则 UE 进入空闲状态，RLF 报告中所包含的额外测量都将丢失。

通常而言，当 UE 出现在未准备的 eNB 时 RLF 报告会丢失。这个问题发生在参考文献［3］中列举的一系列实例中。根据无线资源控制规范，如果重建立失败

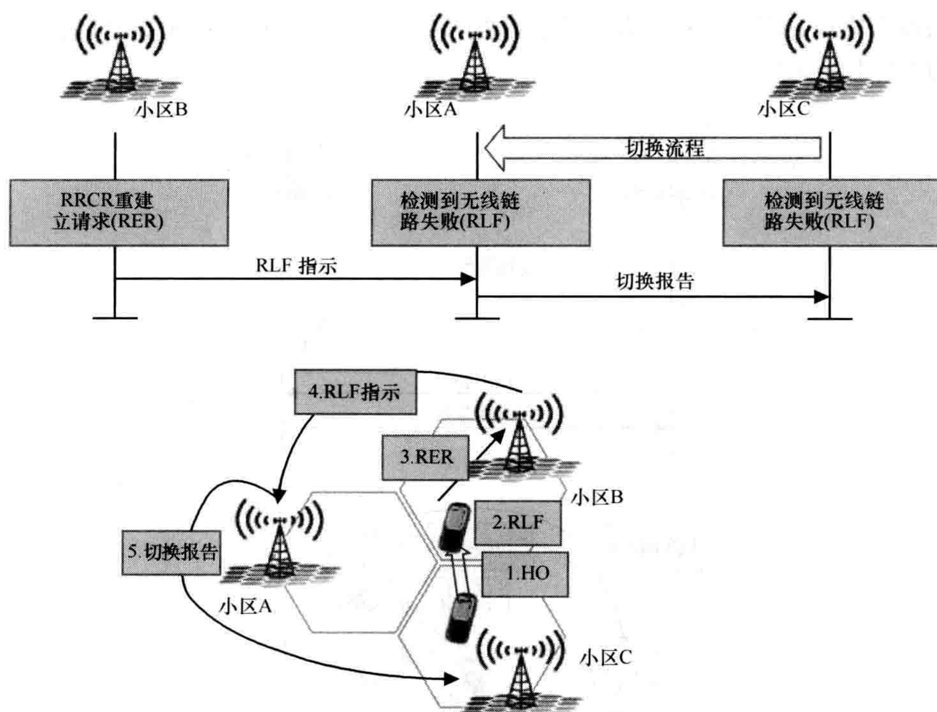


图 10.4　切换到错误小区的信息流程图

或者不可能，则 UE 改变其状态到 RRC_ IDLE，开始小区选择过程。一旦找到适当的小区，则 UE 将尝试建立 RRC 连接。RRC 连接程序不同于重建过程，UE 所提供的信息不同，例如为 UE 提供的最后一个小区的识别或者在没有提供 RRC 新连接程序的小区中 UE 的识别。此外，没有足够的时间来保证建立的完成：由于 NAS 恢复很可能会在连接失败后发生，但不能排除更长的时延。在后一种情况下重新连接可能会对最后服务 UE 的小区产生显著的距离，一个典型的场景是一个大的覆盖空洞。

在空闲状态重连接时，3GPP 决定了基于 UE 的方案。在 Release 10 中，在 UE 进入空闲状态时，RLF 报告同时也会被发送[4,5]。如果 RLF 报告没有发送，将会在 UE 中保存 48 小时，即使 UE 发生了状态转换和 RAT 变化（见图 10.5）

RRC_ IDLE 之后的 RLF 报告具有双重作用，它能够被用来将 MDT 报告集成到覆盖优化（MDT 在 10.3.3 节说明）和 MRO 用例中。RLF 报告包含下列 UE 信息。

（1）发生故障时来自服务小区和可用的邻居小区的小区测量结果。尤其对于下列小区的区 ID，或者全局小区 ID（E-CGI）或者物理小区 ID：

① 失败发生的小区 ID；

② 当最后一次切换命令被接收时的小区 ID；

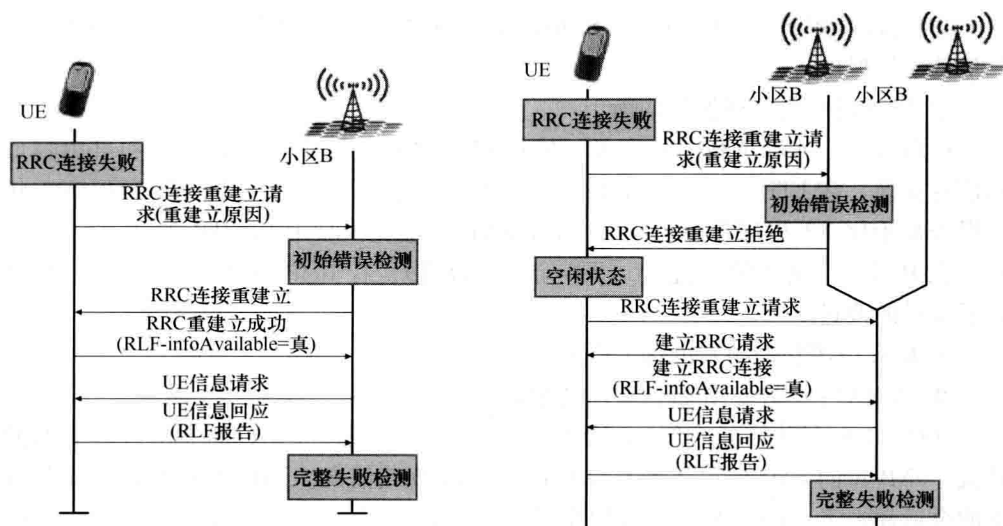


图 10.5 RRC 重建立（左图）和 RRC-IDLE 状态转换（右图）后 RLF 报告恢复

③ 失败后尝试建立连接的小区的区 ID。

（2）在最后的成功切换初始化和失败之间的时间间隔。

（3）在全球导航定位系统功能失败的时候提供精确的位置信息。

（4）指示连接失败类型：无线链路失败，或者是切换失败。

Release 10 UE 在 RRC 连接重建立后，如切换之后，应该发送一个关于 RLF 报告存在的指示。一旦这个网络被通知失败，基站接收到 RLF 报告转发到最后一个服务基站。信息的发送可以使用切换报告来指示其为过早切换或越区切换到错误小区。然而，与 Release 9 不同的是分析完全基于 RLF 报告中的信息。因此在报告中，Release 9 是可选的，现在在 Release 10 中是必需的。

在 Release 10 中也引入了“不必要的 RAT 间切换”；这种情况是指即使 LTE 层提供了足够的覆盖，RAT 间切换仍可以被触发。依据目标 RAT 效率比 LTE 低，用户的满意度会受到影响，可能不是最优的资源分配。该方案建立在一旦 UE 处于其他 RAT 中，则为 LTE 设置的 RAT 间测量值基础上。如果在整个的测量周期内 LTE 被证明比给定的阈值要好，即使没有 UE 的识别，LTE 也将被通知是不必要的切换。

10.3.2 移动性负载均衡

intra-LTE 和 inter-RAT 的移动性负载均衡在 Release 9 中指定。Release 9 中的框架包括：

① 负载报告。Intra-LTE 与 inter-RAT 的报告是不同的。

② 负载均衡动作。Release 8 和 Release 9 版本中的负载均衡关注活跃 UE，因此是基于切换的。

③ 修改切换使负载保持均衡。

负载报告，或者负载信息交换，使得 eNB 之间进行有关负载水平和可用容量的信息交换。在 LTE 小区之间负载信息交换中，报告发送由一个 eNB 利用资源状态报告初始化 X2 程序激活。对于 inter-RAT 信息交换要利用 RIM 通过“SON 容器”在 RIM 上传输 SON 信息（[6] 定义的容器)。在 Release 10 版本只对 MLB 进行了少量的改进。

① LTE 资源状态报告的部分失败。

② 多 RAT：多小区和事件驱动的报告。

在图 10.6 中显示了一个 MLB 的例子。eNB A 过载，而临近的 eNB B 具有低的负载。eNB A 向 eNB B 和其他的临近 eNB 请求负载信息。eNB A 发现提供业务分流的合适候选者。eNB A 提出对切换参数的修改。当 eNB 回应这些改变的时候这些参数被激活。

10.3.3 最小化路测

运营商通常执行路测来监视他们的移动网络，并且进行网络信息统计。当前的测试方法包含一系列的步骤，并且可以手动控制。路测的启动通常由熟练的现场工程师来执行。为专家测量划定特定的网络区域，例如市区或者郊区站点，并装备测试车辆，车辆上一般装在有足够的测试终端，测试设备和额外工具。所收集的信息被用来进行离线分析和理解哪些参数需要调整。

因为目前的方法十分昂贵，路测的自动化成为 3GPP 中运营商最关注的需求。MDT 的目标是利用具有测量记录和定位信息功能的商业 UE。商业 UE 围绕网络进行移动时能够天然的提供信号强度和质量，并且具有许多 UE 测量，能够保证一个持续的报告。

虽然 MDT 和 SON 具有相同的目标以增加网络的性能和减少操作，它们包含的范畴和行为有很大不同，能够进行很好的相互补充。事实上 MDT 集中在网络优化，并不在配置和恢复上。此外 MDT 只提供没有闭环机制的 SON 中的网络测量值。

Release 10 中 MDT 的焦点是覆盖优化，覆盖是网络性能和终端用户经验的基本功能。收集统计信息是为了得到可靠的覆盖范围地图，以检测网络覆盖是否薄弱，或者存在覆盖空洞和超射。超射是指一个小区出现后的覆盖远超过计划的数值。

其他 MDT 的用例被推迟到 Release 11。在撰写 MDT Release 11 的工作范畴时已经强调了 QoS 验证和最优化覆盖的进一步改进。

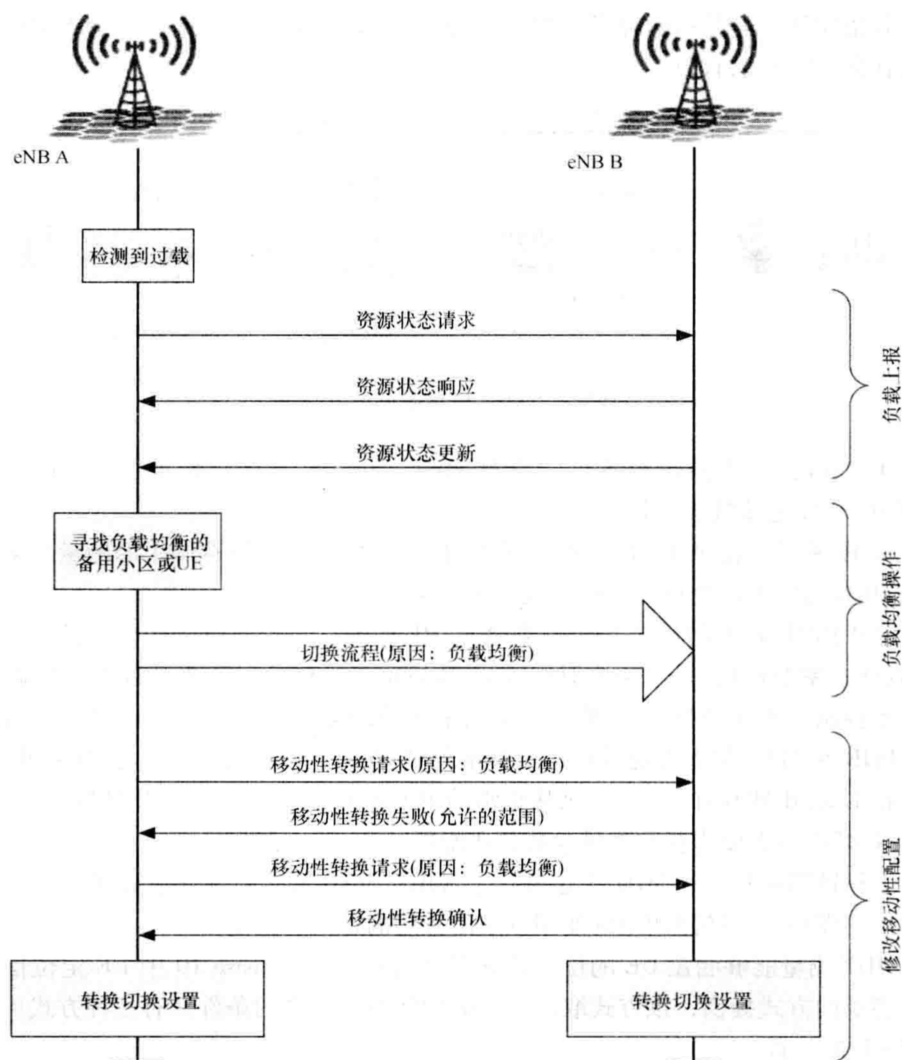


图 10.6　移动性负载均衡

10.3.4　MDT 的管理和报告

MDT 可以通过以下两种方式进行设置：

① 基于面积的 MDT，其中 UE 测量数据通过一系列的小区或者定位区域/路由区域或者跟踪区域。

② 基于 MDT 的订阅，UE 测量数据收集用来指定具体的订阅者或者设备。

测量数据在 eNB 中收集并以 MDT 报告的形式传输到数据存储库中，即所谓的

跟踪收集实体。这儿有两种形式MDT报告，并在图10.7中展示。两种类型的报告可以在同一时间内有效。

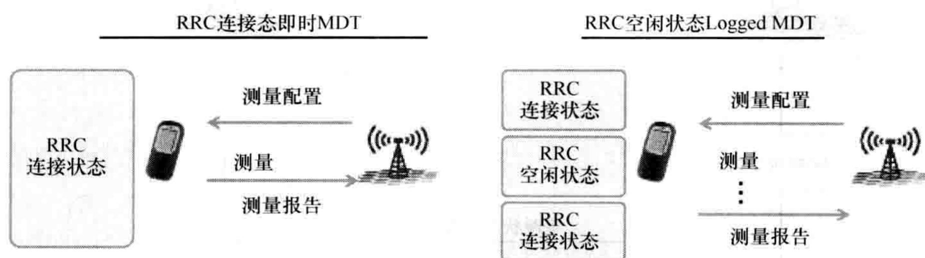


图10.7 即时和Logged MDT测量

① 在报告触发器时配置了“立刻MDT”的UE发送测量报告到eNB。立刻MDT在RRC连接状态时是活动的。

② 配置了“记录MDT”的UE在处于RRC空闲状态时存储了的测量结果，并且当RRC连接下次变得有效时要发送报告到eNB。

对于即时MDT测量结果包括普通的RF参数，即信号水平和质量等。另外，UE发送功率余量报告（Poner Headroom Reponting，PHR）用来帮助上行链路调度和功率控制。尤其PHR一直被认为是用来区分问题是在上行链路还是下行链路连接。PHR在MAC层上发送并经过上行链路到eNB，包含在到TCE的MDT报告中。

在Logged MDT中，UE记录从正常的单元重选过程中获取这些测量值，因此，Logged MDT不需要为获取测量参数具体配置。

上行链路测量也在MDT中也进行了考虑；SINR和上行链路信号强度由eNB测量得出，那些上行链路测量的使用方式由特定的运营商选定。

MDT测量能够涵盖UE的位置信息和时间戳。在Release 10中UE定位信息以力所能及的方式提供，该方式取决于终端的能力和网络的条件。有三种方式可用于确定UE的位置：

① 手机ID（根据即时报告一直跟踪）。

② RF标识（基于对临区的测量）。

③ 独立的全球导航卫星系统定位。

测量的配置需要考虑UE的电池生命周期。如果测量的执行和汇报太频繁，它将可能影响UE的能量消耗。

10.3.5 节能

在过去几年中，对于移动运营商，能量的消耗一直是重要的问题，节能的目标是保持UE感知的服务质量的同时最小化能量消耗。

运营商的能量消耗主要是由于以下几种原因：

① 数据的蓬勃发展迫使运营商建立更多的基站和新的广播技术。

② 能量消耗正在增加。

③ 京都协议：运营商可能被强制购买 CO2 证书，如果超过预定义的能量消耗或者对于某些国家，运营商每年的最大能量消耗上有一定的限制。

无线接入网络，特别是基站，被认为是移动网络全局能量消耗的最大部分，因此也是节能考察的主要因素。网络通常是被规划来满足更高的流量需求，即使非高峰时段会需要少得多的容量。基于 SON-ES 的很大的潜力来源于 UE 的流量分布。通常夜间业务模型与白天的业务模式有很大差异。例如，很多用户要求在白天（比如在工作时间）进行语音通话，而对数据的请求在傍晚和夜间会显著增加。图10.8 给出了一个例子，反映了市区一天的情况。最有可能在未来会转向更多的数据流量方向。

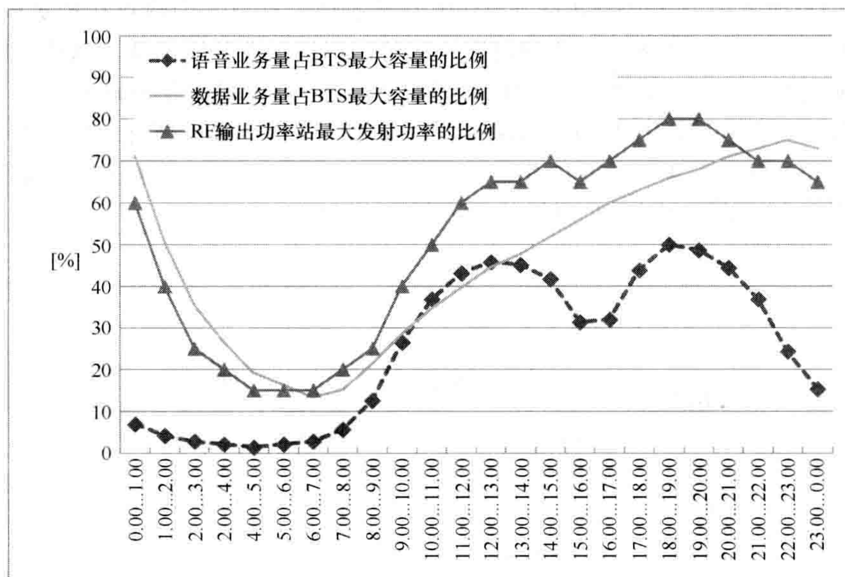


图10.8　一天的流量示例

这里有好几种方式可以节约能量。

(1) 最高效的一种方式是部署能够极大节约能量的硬件设备来替代旧的设备。

(2) 功率发生器是一个主要的能量消耗部件；将旧的基于柴油现时发电机更换成再生能源（如太阳能、风能等）来提供，可以节约大量的能量。

(3) 供应商有自己的具体解决方案，例如：

① 在多个频率层的情况下，关掉第二个（和第三个）载波。

② 在 LTE 的情况下，禁用一个 MIMO 路径。在低流量期间使用较低的发射功率并且保持相同的覆盖率。

（4）关闭所有比较低或根本没有负载的节点。基站的开启和关闭是 3GPP 标准化的一个解决方案。在 Release 9 中描述了 LTE 系统内部的情况，定义了基本的 X2 信令用于 eNB 通信，也就是说，关闭通知及开启指示。在 Release 10 的 SI 中[7]，包含额外的情况，例如 Multi-RAT，和一些机制（基于 OAM 或基于无 OAM 干扰的信号跨域 RATs），最后相关的工作内容将在 Release 11 中完成。

在参考文献［7］中提出了一组场景：Inter-RAT，Inter-LTE 和 Intra-LTE。在下面的描述中，这些场景分成两组：eNB 重叠覆盖和容量受限。

10.3.6　eNB 重叠覆盖

图 10.9 包含了一个覆盖层以及在覆盖层中一个或多个容量提升单元。覆盖层可能由 LTE 或者一个之前的 RAT（2G/3G）来提供。这里一个热点在低负载/无负载的过程中可以完全关闭，因为通过宏小区可以保持覆盖范围不变。这些小区的开关可以通过 OAM 机制或者通过无 OAM 参与下的多 RAT 间信令传输来执行。相关的邻居节点将会获取该基站的关闭决定，且当邻居节点负载过高时，其可以要求开启该站点。实际上，由于非统一化的 UE 分布，宏基站要求开启小区站点来分流网络负载将存在风险，因为 UE 可能处在不同的区域中。

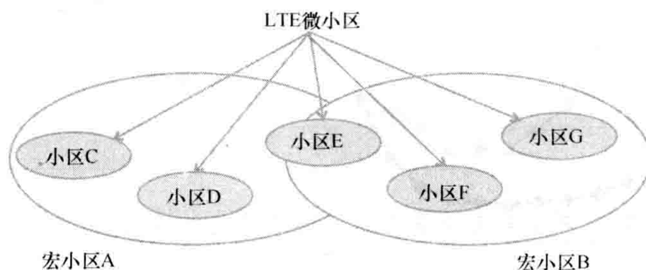


图 10.9　eNB 重叠覆盖场景

10.3.7　容量受限的网络

图 10.10 给出了基本原理：在高峰时段，由于需要管理业务，所有小区均处于非节能模式，这样是为了确保目标服务等级。在非高峰时段，激活的小区数量可能会减少，并确定某个小区进行补偿，确保整体覆盖。这个场景是相当复杂的，因为需要动态的改变小区的密度，并且需要根据未来的变化，如天线倾角和发射功率，来进行相应的调整。该场景未包含在 Release 11 中。

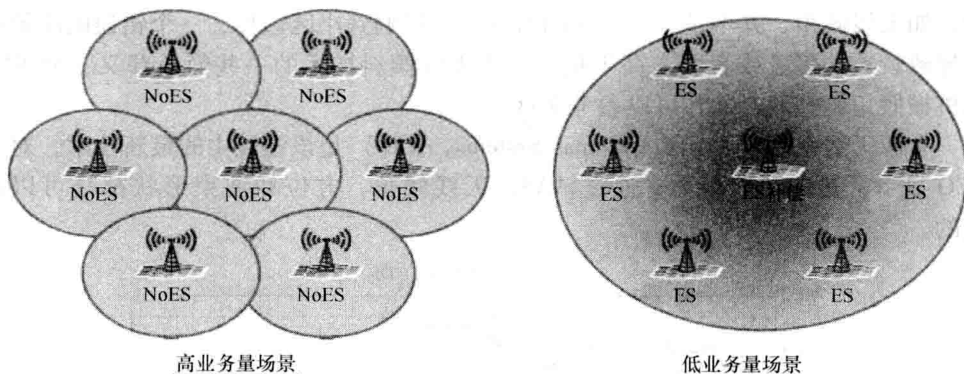


图 10.10　容量受限的网络。ES = 节能

10.3.8　容量和覆盖优化

容量和覆盖优化（Coverage and Capacity Optimization，CCO）的主要目标是通过最小化无线资源的利用来提供足够的覆盖和容量。CCO 首先要最大化覆盖区域，这意味着接收信号质量要高于最小值来保证连续覆盖。CCO 的第二个目标是为整个覆盖区域提供足够的信号质量。第三个目标是最大化系统吞吐量（以 Mbit/s 来衡量）。因此 CCO 可以改善覆盖，提升小区边缘比特速率和吞吐量。

CCO 耗资巨大也是很耗时的一项工作，考虑到网络的覆盖和容量可能会根据环境的不同而改变。环境受制于一系列因素：例如影响环境的因素包括新建筑物的建设和/或季节的变化，再如树叶的生长与凋零，以及其他一些因素等。如果网络没有规范的控制，而环境由最初的假设开始变化，容量和覆盖可能会降低。

这些环境在本质上的改变是非常缓慢的，所以没必要做出快速的应对。由于其改变缓慢的属性，可以通过不同领域相关门限的关键性能指标（Key Performance Indicator，KPI）来触发。

覆盖和容量可以通过几种方式来优化，例如调整天线参数。但是这可能需要在基站处安置远程电调（Remote Electrical Tilt，RET）或有源天线。通过调整天线倾角，半功率波束宽度，或者天线方向，使得信号水平能够根据不同的小区方位进行调整。另外，也可以调整下行链路发射功率，传输参考信号功率或功率控制参数等。3GPP 方法主要用于集中式架构（参考 TS 32.522），COO 的逻辑模块置于 OAM 系统中。

RET 在时下越来越受欢迎，因为它无需到达站址和上站，而且倾角可以通过 OAM 远程控制。然而，远程电调倾角也有一定的局限性，同时也无法完全脱离机械倾斜。虽然 RET 提供了巨大的优势，但是也必须谨慎考虑，因为天线参数的改

变，如天线倾角，并不是一个简单的行为，它影响到小区边界，一个错误的决策可能导致较差的覆盖或者引入高干扰。关于天线倾斜技术的一些简单释义，如RET和机械倾角调整的对比，可以参考文献［1］。

有源天线系统（Active Antennas Systems，AAS）是该领域中的最新技术，对于CCO显示了其良好的潜力。通过AAS，天线倾角，方位和波束形状都是可以改变的。

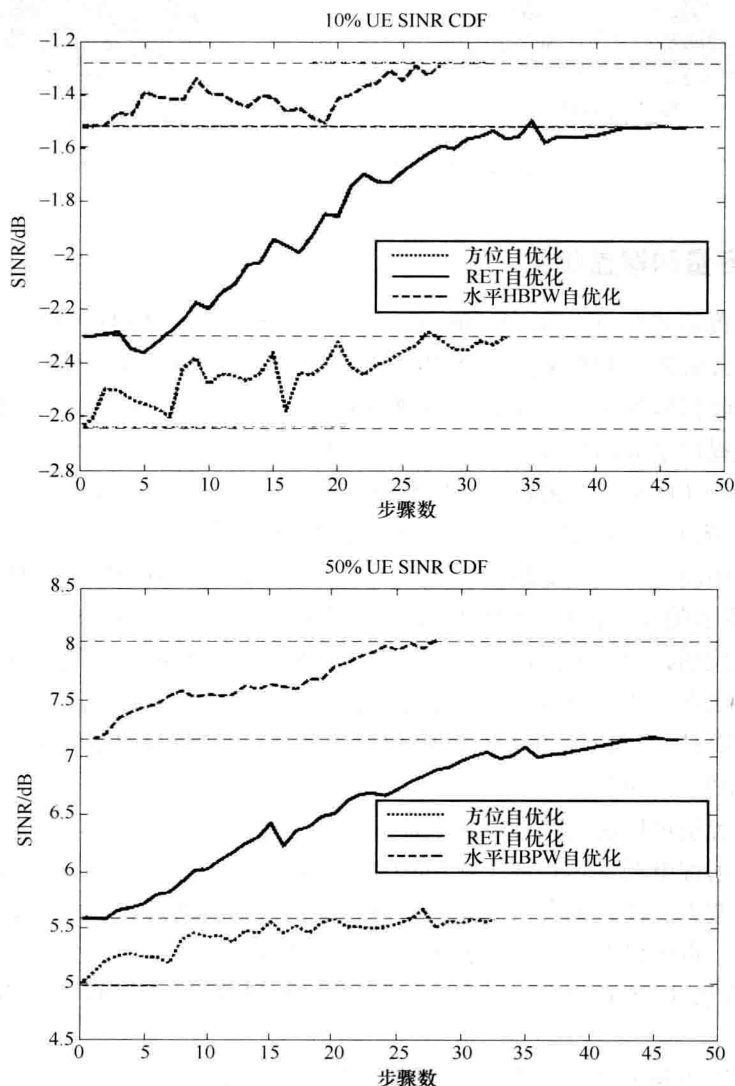


图10.11　每优化步骤[9]下的10%（上图）和50%的情况以及SINR CDF的点数（续）

一个关于“基于 CCO 的天线参数优化”的方法见诸参考文献［1］，该方法是基于参考文献［8］的研究结果。在该参考文献中，通过改变天线参数，网络的覆盖和容量问题都可以实现优化。检测通过关键性能指标进行获取，KPI 既包括 eNB 的性能管理计数器，也包括测量（例如信道状态标识，信道质量标识或者切换统计）；CCO 在 OAM 系统进行决策。对于如何改变天线的配置，可以使用一种基于案例学习的算法来确定。

能够完成的优化量取决于所选配置及优化开始时的“最佳”优化程度配置。

参考文献［8］假设 LTE 系统与 3G 网络具有相同的站址和倾角。倾角的初始化是根据 3G 标准进行规划的，考虑了软切换增益（LTE 采用硬切换）。研究表明，在使用远程电调倾角进行自优化之后，倾斜角度增加了，并且小区重叠覆盖区域变小了。优化天线参数后的性能结果如图 10.11 所示：当改变天线参数时，50% 和 10% 的 SINR CDF 曲线显示了容量和覆盖的优化情况。50% 表示 UE 在小区中的平均性能情况，10% 表示 UE 位于最差的信道条件下以及小区边缘的情况。图 10.11 显示了网络容量相对于网络覆盖来说有更明显的 SINR 增益。

10.4 自愈合

电信业中，网络的运营及故障的排查被视为主要的成本因素。自愈合标准一般主要由 SA5 来确定；在书写本书时，已有一项 3GPP 技术规范[10]。

小区中断补偿

小区中断是指 eNB 在硬件软件问题未预先规划或者由于已规划的网络维护或节能目的变得不可连接的情况。网络覆盖的消失可以通过临近的 eNB 增加发送功率进行部分补偿，例如，增加导频信道功率，或者降低天线下倾角，如图 10.12 所示。

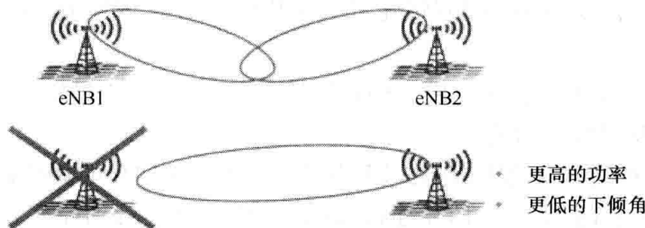


图 10.12　eNB1 停运补偿

至于调整功率还是天线下倾角，取决于系统 RET 功能是否可用以及基站的功率水平。为了补偿中断区域，最便利的措施是增加中断小区邻区的发射功率。在另

外这端，通常将基站的功率设置为最大值。如果真是这种情况，若远程电调天线倾角可用，则天线倾角可以考虑重新进行校准。

由于小区中断会导致业务的不可用，此时最重要的是快速恢复中断连接；一般情况下，小区中断可以通过告警检测到，但是需要在覆盖和容量优化中加入性能管理计数器。

参考文献［1］给出了小区中断补偿的例子，详细描述了模拟网络场景下三扇区基站的故障，以及通过优化的发射功率和天线倾角进行补偿的方案。

然而，COC 并不适用于所有的网络条件。在城区部署中，如较小的站间距和冗余覆盖已经能够确保业务正常进行，尽管容量有所降低，甚至无需改变天线倾角。但在覆盖受限的场景中并不适用，由于大的站间距已经部署了最大的功率水平和最小的倾角，因此在覆盖恢复时功率和倾角都无法再改变。另外，其他的因素如天线与其他技术共享时，可能也并不支持功率和天线倾角的调整，这会影响到邻区正常通信。

10.5 3GPP Release 11 中的 SON 的特征

3GPP Release 11 根据以下的 SON 特性开展工作：

① 移动鲁棒性优化（MRO）增强功能。MRO 在 Release 10 中适用于 LTE 系统内，在 Release 11 中对相关功能进行了增强，可用于 inter-RAT 场景。

② Intra-RAT 和 inter-RAT 的情况下，乒乓切换和短时停留的最小化。该项目标是最小化不必要的移动性事件和相关的信令及 UE 功耗。

③ 基于 QoS 的要求和不同 RAT 的 QoS 能力优化选择 RAT。

④ inter-RAT 场景下的自动邻居关系增强。

⑤ MRO 和其他流量控制机制如移动性负载均衡的协调。

⑥ 核对小区无线资源状态的研究方法。

在评估阶段之后，RAN3 #75（2012 年 2 月）次会议明确了 Release 11 工作项目仅限于对主题最相关的即处理故障场景情况和 inter-RAT 间乒乓切换场景进行研究。

故障场景为

① 移出 LTE 的覆盖范围故障：LTE 连接失败，UE 在 2G 或 3G 上发起重连接，在 LTE 系统未及时触发切换。

② 进入 LTE 的覆盖范围故障：UE 从 2G 或 3G 向 LTE 的切换被触发，但在切换过程中或切换后随即发生 LTE 连接失败，UE 重新连接到原系统。这种情况为 LTE 切换触发过早。

③ LTE 内的 HetNet 部署：切换至微微小区时切换触发过早或切换到错误小区；现行 Release 9 或 10 的机制并不允许验证哪个切换标准是正确的（例如区分：快/慢速 UE，eICIC 能力 UE，或旧设备，等等）

Inter-RAT 乒乓检测:

检测 inter-RAT 乒乓切换要收集特定的小区乒乓切换的统计信息；如果 UE 不返回到与乒乓切换开始的同一小区（例如，当从 LTE 小区 A 触发到 3G 时，UE 返回到 LTE，但是，返回了另一个不同的小区 B，小区 A 将会被告知出现问题）。

节能方面，Release 11 的重点是实现 inter-RAT 间能通过一个微微小区进行唤醒的通信机制，并通知邻区相关的小区已经暂停服务。工作项目组也提出了一个机制来检测场景中（如宏小区已过载，其他微微小区在宏小区覆盖范围之内）哪个微微小区需被唤醒。

10.6 小结

第一组 SON 的特性是在 3GPP Release 8 中定义的。SON 的目标是提升网络性能，最大限度地降低运营费用，提高网络资源利用率以及减少小区中断的影响。首个 SON 算法重点考虑了网络的自配置，后期的 3GPP 版本包含了更多的关于自优化和自愈合的特性。Release 9 引入了移动性优化和节能，Release 10 包含了容量和覆盖的优化，以及最小化路测。最小化路测可使用商用 UE 来提供反馈，从而优化网络——进而最小化高昂的路测成本。未来 3GPP 的工作，需要重点关注 LTE 与 HSPA 之间的 inter-RAT 优化，以及适用于 LTE-Advanced 无线演进的 SON 新特性。

参 考 文 献

1. Hämäläinen, S., Sanneck, H. and Sartori, C. (2011) *LTE Self-Organizing Networks (SON)*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
2. 3GPP TR3.023 (2010) Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions, ver.0.1.0., Release 10, 24 June.
3. 3GPP R3-100916 (2010) SON_replyLS_RAN2_disc, 2010.
4. R3-102341 (2010) SON_MRO_idle_req: Enabling UE-originated RLF reporting in case of RRC connection setup, Nokia Siemens Networks, August.
5. R3-102342 (2010) SON_MRO_idle_info: Information to be reported in the UE-originated RLF reporting in case of RRC connection setup, Nokia Siemens Networks, August.
6. 3GPP TS 36.413 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP) (Release 10).
7. 3GPP TR36.927 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, Potential Solutions for Energy Saving for E-UTRAN, ver.10.0.0., Release 10, 24 June.
8. Yilmaz, O.N.C., Hamalainen, S. and Hamalainen, J. (2009a) Analysis of antenna parameter optimisation space for 3GPP LTE. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Anchorage, Alaska, September.
9. Yilmaz, O.N.C., Hamalainen, S. and Hamalainen, J. (2009b) Comparison of remote electrical and mechanical antenna downtilt performance for 3GPP LTE. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Anchorage, Alaska, September.
10. 3GPP TS32.541 (2011) Technical Specification Group Services and System Aspects; Telecommunication management; Self-Organizing Networks (SON); Self-healing concepts and requirements.

第11章　性能评估

Harri Holma and Klaus Pedersen

11.1　简介

国际电信联盟（International Telecommunication Union，ITU）为IMT-Advanced系统定义了新的需求，要求这个全新的系统相比10年前定义的IMT-2000系统能够带来实质性的性能提升。这些新目标包括多种环境下峰值/平均数据速率、频谱效率、时延、移动性、频谱灵活性，等等。另外，3GPP针对其LTE-Advanced也定义了相应的目标，且更高于ITU的要求。本章主要阐述这些系统目标要求以及相应的性能评估结果。

LTE-Advanced相比LTE Release 8在多个方面增强了系统性能：空域、时域、频域，主要的增强方面在图11.1中列出。空域增强特性主要在于更好地利用MIMO/波束赋型解决方案来提升数据速率和频谱效率。MIMO技术的增强还包括多小区场景下的应用，即协同多点传输（Coordinated Multipoint，CoMP）技术。LTE-Advanced还实现了包括微小区和中继节点的异构网络。在频域的增强主要是利用载波聚合技术实现下行链路100MHz高带宽传输和上行链路多簇调度能力。这些新的特性为LTE-Advanced带来相比Release8较大的性能提升。

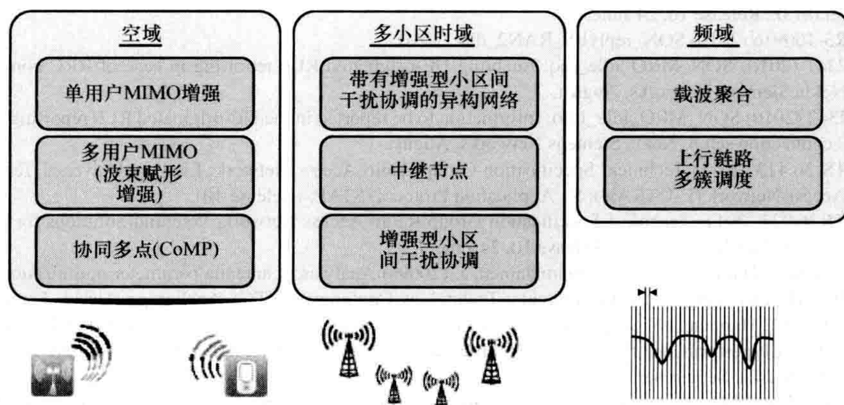


图11.1　LTE-Advanced性能解决方案总结

本章在 11.2 节介绍由 ITU 和 3GPP 定义的性能目标。在 11.3 节给出性能评估结果。LTE-A 新特性下的每用户最大容量以及覆盖性能在 11.4 节中进行评估。最后在 11.5 节对本章进行总结。

11.2 LTE-Advanced 目标

ITU 为 IMT-Advanced 系统定了具体的性能目标[1]。IMT-Advanced 系统需要在本地区域支持非常高的数据传输速率，并支持多种服务下的高移动性和灵活性。下行链路峰值频谱效率在 4 ×4 MIMO 下可达到 15bit/s/ Hz，上行链路峰值频谱效率在 2 ×4MIMO 下可达 6.75bit/s/ Hz。在 100MHz 带宽下，上行链路/下行链路峰值数据速率可分别达到 675Mbit/s/1.5Gbit/s。ITU 还定义了控制面从空闲状态激活必须低于 100ms 和单程用户面时延低于 10ms 的延迟要求。频带内切换的中断时间要求小于 27.5ms，带间切换要求低于 60ms。

小区频谱效率目标分别对平均情况下和小区边缘情况下进行了定义。小区边缘的定义是用户吞吐量的累积分布函数的 5% 点。IP 语音的容量定义为每兆赫带宽支持的用户数，考虑 50% 的语音活动性和最大 50ms 的空口时延。天线配置假设终端两根天线和基站四根天线，即下行链路 4 ×2、上行链路 2 ×4。

ITU 对下行链路的平均和小区边缘频谱效率要求如表 11.1 所示，上行链路如表 11.2 所示。这里考虑四种不同环境场景，包括室内、微蜂窝、基本城区覆盖和高速郊区场景[2]。室内场景的要求最高，主要是考虑信道传输环境较优。微蜂窝场景次之，基本城区宏蜂窝和高移动性场景的要求最低。总体而言，下行链路需求相比上行链路需求要高 30% ~60%，原因在下下行链路一对多的调度效率高于上行链路多对一的情况，同时下行链路发射功率也更加富裕。小区边缘需求约为平均需求的 3%。小区边缘吞吐量主要受限于小区间干扰。

表 11.1 ITU 和 3GPP 对 IMT-Advanced 的性能要求下行链路 4 ×2/(bit/s/Hz/小区)

	平均频谱效率	小区边缘频谱效率	VoIP 容量（用户数/MHz/小区）
室内	3.0	0.100	50
微小区	2.6	0.075	40
基本城区覆盖	2.2	0.060	40
高速郊区	1.1	0.040	30
3GPP Case 1	2.6	0.090	未标准化

表 11.2　ITU 和 3GPP 对 IMT-Advanced 的性能要求上行链路（bit/s/Hz/小区）2×4

	平均频谱效率	小区边缘频谱效率	VoIP 容量/（用户数/MHz/小区）
室内	2.25	0.070	50
微小区	1.8	0.050	40
基本城区覆盖	1.4	0.030	40
高速郊区	0.7	0.015	30
3GPP Case 1	2.0	0.070	未标准化

3GPP 还在参考文献［3］中专门针对 LTE-Advanced 定义了一套目标。3GPP 的目标高于 ITU 要求。3GPP 还分别针对不同天线配置（基站 2 根天线/4 根天线，终端 2 根天线/4 根天线接收，终端 1 根天线/2 根天线发射）定义了相应的目标。这里主要专注于 3GPP 宏蜂窝场景（Case 1），其类似于 ITU 定义的基本城区宏蜂窝覆盖场景。

11.2.1　ITU 评估场景模型

室内场景模拟了在公共场所或办公室环境下的多小区环境。用户是静止的或者以步行速度移动的。场景包括一个由 16 个 15m×15m 房间和 120×20m 走廊组成的楼层。两个基站的长厅放在中央走廊 30m 和 90m 的位置。室内场景具体如图 11.2 所示。基站功率为 24dBm，天线增益为 0dBi。室内的情况下使用 20MHz 的带宽，而其他情况下使用 10MHz。用户数量为每小区 10 个，假设业务模型为满队列模型。

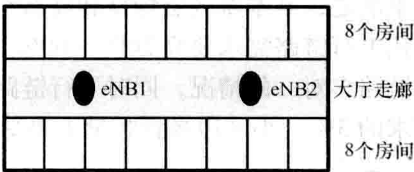


图 11.2　室内场景模型

微蜂窝场景模拟了高容量密集城区解决方案，即采用 200m 站间距和 41dBm 的基站发射功率。基站天线高度为 10m，最大增益 17dBi。部署场景基于曼哈顿栅格模型，部分用户处于视距通信环境下。微蜂窝测试环境包括室外和室外-室内用户：对于后者用户位于室内而基站部署在室外。因此，微蜂窝测试环境的信道模型包括两部分，即室外模型和室外-室内模型。该场景下视距通信概率约为 60%。

城区覆盖场景具有更远的站间距（500m），更高的天线高度（25m，屋顶之上）和更高的基站发射功率（46dBm）。该场景针对连续覆盖下的行人和快速车辆用户。视线概率在城区覆盖情况下为 28%。对于非视线链路，在基站的平均角度色散等于 26°。城区覆盖场景的示意图如图 11.3 所示。

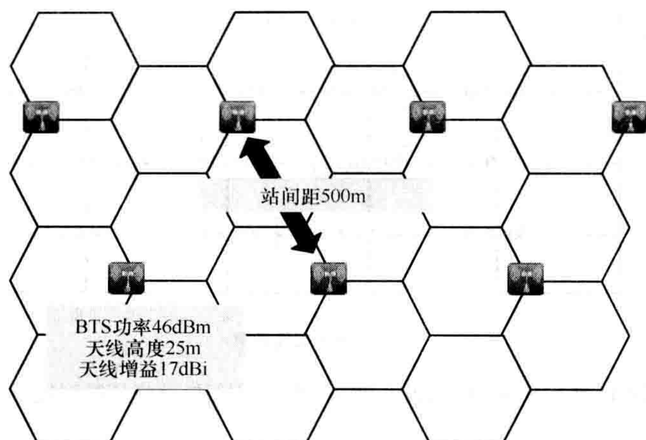


图 11.3　基本城区宏小区覆盖场景

高速环境场景模拟大型蜂窝小区覆盖下的时速高达 120km 的车辆和列车。站间距为 1732m，基站天线高度为 35m。对于微基站、城区覆盖、高速移动场景下，基站天线的前后比均为 20dB。天线下倾角的影响在这三种场景下都有考虑，但在室内场景下则仅考虑简单的二维天线模型。

仿真中考虑了来自控制通道和参考符号的开销。对于下行链路，每个 TTI 的前三个符号被保留用于控制信道，并将参考符号的开销去除。对于上行链路，四个 PRB 被保留用于 PUCCH，同样将参考符号开销去除。

11.3　LTE-Advanced 性能评估

11.3.1　峰值数据速率

系统峰值数据速率随带宽和天线数量的增强而提升。LTE-Advanced 不同天线配置下的峰值数据速率如图 11.4 所示。UE 最低要求是两个接收机天线。计算过程中假设 20 + 20MHz 的载波聚合和 64QAM 调制方式。单流峰值速率为 150Mbit/s，双流下为 300Mbit/s，四流为 600Mbit/s，在 8 × 8MIMO 下可超过 1Gbit/s。如果使用最高 100MHz 频谱，LTE-Advanced 的峰值数据速率将达到 3Gbit/s。LTE-Advanced 可提供最高 30bit/s/Hz（8 × 8MIMO）和 15bit/s/Hz（4 × 4MIMO）的峰值频谱效率，超出 ITU 给出的性能要求。ITU 的评估场景假设总结在表 11.3 中。

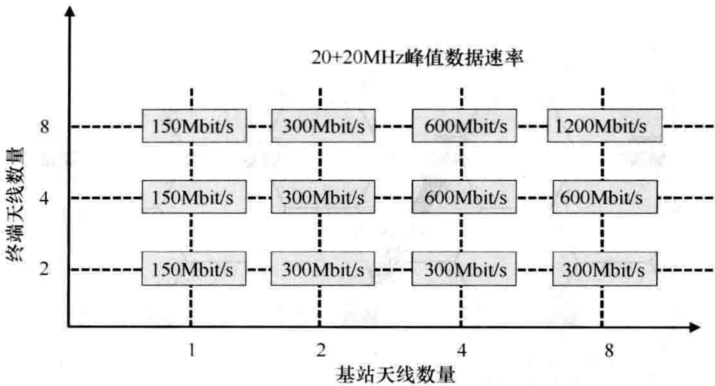


图 11.4　不同天线配置下 20 +20MHz 下行链路峰值数据速率

表 11.3　ITU 评估场景

	室内	微蜂窝	基本城区覆盖	高速郊区
站间距	60m	200m	500m	1732m
载波频点	3.4GHz	2.5GHz	2.0GHz	800MHz
基站天线高度	6m	10m	25m	35m
基站发射功率	21dBm	41dBm	46dBm	46dBm
基站天线增益	0dBi	17dBi	17dBi	17dBi
终端发射功率	21dBm	24dBm	24dBm	24dBm
终端移动速度	3kmph	3kmph	30kmph	120kmph
带宽（FDD）	20MHz	10MHz	10MHz	10MHz
每小区用户数	10	10	10	10
业务类型	满队列	满队列	满队列	满队列

11.3.2　用户类别

3GPP Release 8 定义了 5 种 UE 类别，典型的商用终端为 3 类和 4 类终端，采用 2 ×2MIMO，具备 100 ~150 Mbit/s 下行链路峰值数据速率和 50Mbit/s 上行链路峰值数据速率。Release 10 增加了三个新的 UE 类别，如表 11.4 所示。6 类和 7 类终端将峰值数据速率推升至 300Mbit/s，分别使用 4 ×4MIMO +20MHz 载波和 2 ×2MIMO +40MHz 载波聚合来实现。8 类终端是 3GPP 定义的商用终端中峰值数据速率最高的：可达下行链路 3Gbit/s 和上行链路 1.5Gbit/s，利用了自 Release 8 以来的所有增强手段：5 ×20MHz 载波聚合，下行链路 8 ×8MIMO，上行链路 4 ×4MIMO，上行链路 64QAM 调制。

表 11.4 Release 10 中的新 UE 类别（CA：载波聚合）

UE 类别	6 类	7 类	8 类
下行链路峰值数据速率	300Mbit/s	300Mbit/s	3000Mbit/s
上行链路峰值数据速率	50Mbit/s	100Mbit/s	1500Mbit/s
下行链路调制方式	64QAM	64QAM	64QAM
上行链路调制方式	16QAM	16QAM	64QAM
下行链路 MIMO	2×2+CA 和 4×4 无 CA	2×2+CA 和 4×4 无 CA	2×2+CA 和 4×4 无 CA
上行链路 MIMO	无	2×2	4×4

11.3.3 ITU 效率评估

本节介绍面向 ITU 目标的性能评估。LTE-A 的平均和小区边缘频谱效率已经由多家 3GPP 参与公司通过系统级仿真进行模拟评估，详细的结果在参考文献［4］展示。平均频谱效率如图 11.5 所示，小区边缘效率如图 11.6 所示。COMP 和异构网络特性没有包含在仿真中。从这些结果，可以看到如下几方面结论：

① 仿真性能在所有场景下均超过 ITU 目标。大部分场景下的性能相比 ITU 要求高 25% 以上；只有对于微蜂窝和城区覆盖场景的上行链路平均数据效率，差别小于 10%。

② 下行链路小区边缘频谱效率仅为平均频谱效率的 3%，峰值数据速率的 1%。这清楚地说明了在高小区间干扰存在的情况下保持连续的高数据速率所存在的挑战。上行链路的小区边缘频谱效率为上行链路平均频谱效率的 5% 和峰值数据速率的 1%。

③ 下行链路平均频谱效率相比上行链路频谱效率要高出 75%，这取决于单点对多点传输和更高的功率。对于小区边缘频谱效率，上行链路和下行链路之间的差异较小——仅为 20%。下行链路的小区边缘用户受到小区间干扰的影响要大于上行链路用户链路。

④ 室内场景提供了相比其他场景更高的容量，这主要是由于室内小区间干扰相对很小。室内容量接近微蜂窝容量，相比城区覆盖场景则要为两倍以上。

⑤ 微小区的平均频谱效率相比城区覆盖场景要高 25% 以上。

⑥ 高速移动场景下的下行链路频谱效率相比城区宏蜂窝场景约低 20%，而上行链路频谱效率则是城区宏蜂窝场景更高。上行链路的性能提升主要是由于在高速郊区场景下采用低频点而使得信号传播特性好。

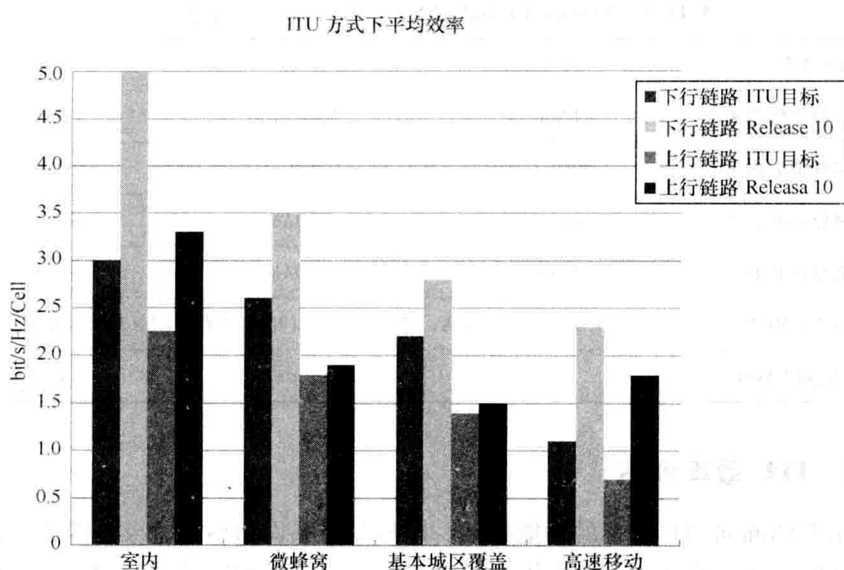


图11.5　不同ITU环境下的平均频谱效率

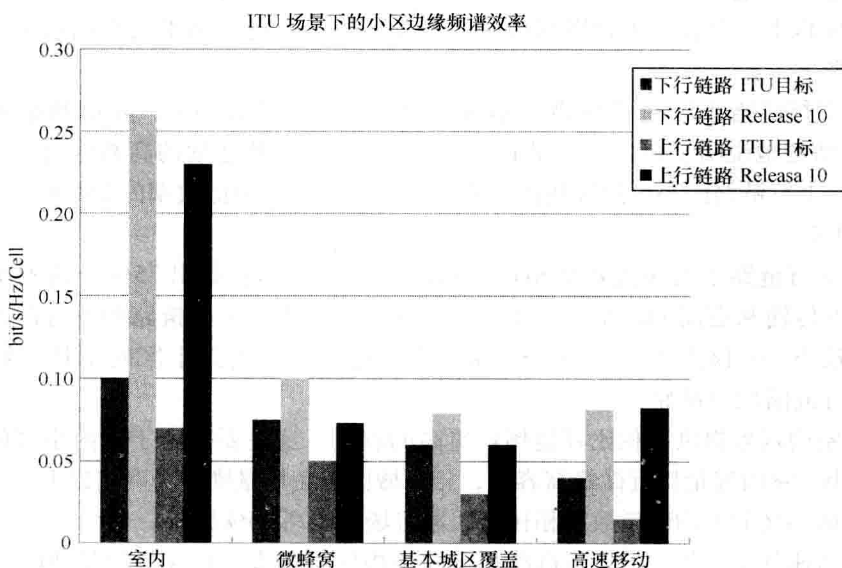


图11.6　不同ITU场景下的小区边缘频谱效率

VoIP 仿真评估结果如图 11.7 所示。仿真假设 50% 的语音激活率，最高 50ms 的单向空口时延和 2% 的中断概率。LTE-Advanced Release 10 的 VoIP 超过 ITU 定义需求的两倍。仿真得到的容量结果是微蜂窝和宏蜂窝场景下约为 69 ~ 94 用户数/MHz/小区。如此高的语音容量使得 LTE-Advanced 仅使用 1 ~ 2MHz 带宽即可提供热点部署场景下的语音容量需求。

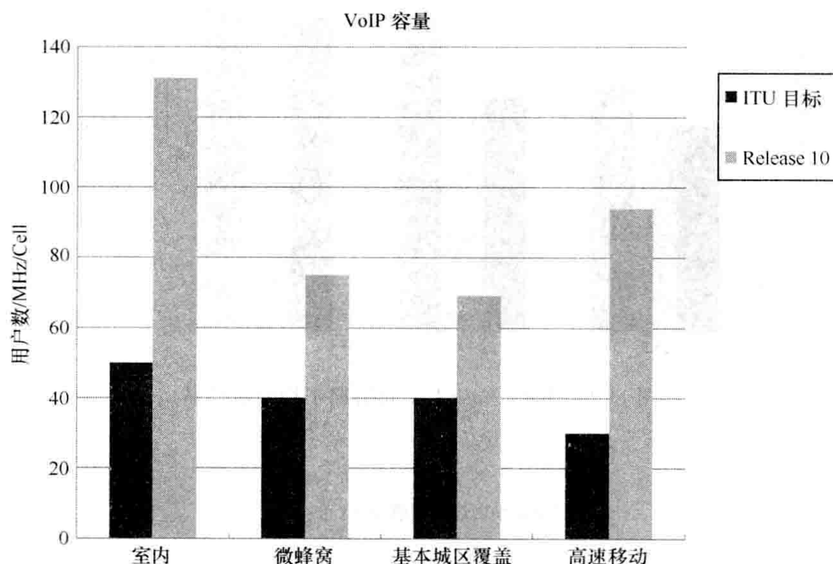


图 11.7 不同 ITU 场景下的 VoIP 效率

11.3.4 3GPP 效率评估

针对 3GPP 的性能评估目标在参考文献 [5] 中给出。下行链路评估结果总结在图 11.8 和图 11.9 中，分别包括平均和小区边缘的频谱效率。相应的上行链路结果如图 11.10 和图 11.11 所示。这些结果中包括 LTE Release 8 的性能、3GPP Release 10 的目标和 Release 10 的实际评估结果。Release 10 评估性能结果在各种场景下均超过目标至少 10%。Release 10 的增益优势在 4×2MIMO 配置下得以显现，相比 Release 8 2×2MIMO 配置，小区边缘和平均频谱效率均可得到 50% + 的性能增益。更高的频谱效率可以通过在 UE 安装 4 根天线来实现：采用 4×4MIMO 可以得到 100% 的小区平均效率增益，且最高可达 150%。在 4×4MIMO 下的小区平均频谱效率为 4.7bit/s/Hz/小区，即在 20MHz 带宽可获得 100Mbit/s 速率或 100MHz 信道带宽下达到 500Mbit/s。

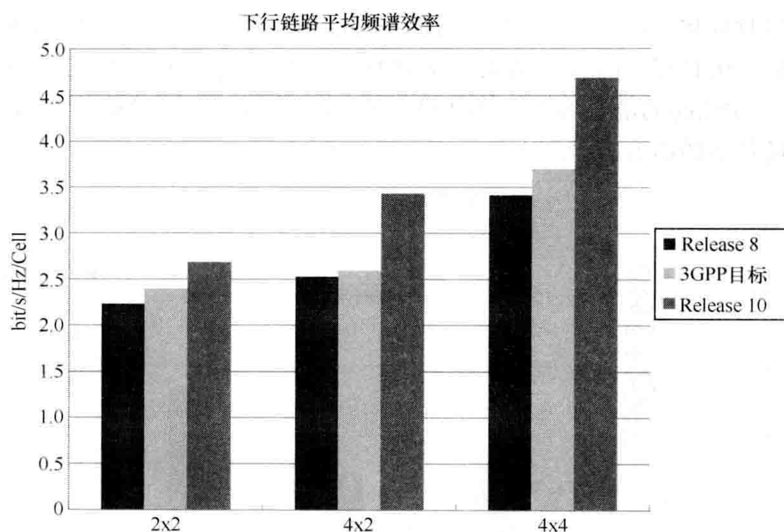


图 11.8 3GPP Case 1 下行链路平均频谱效率

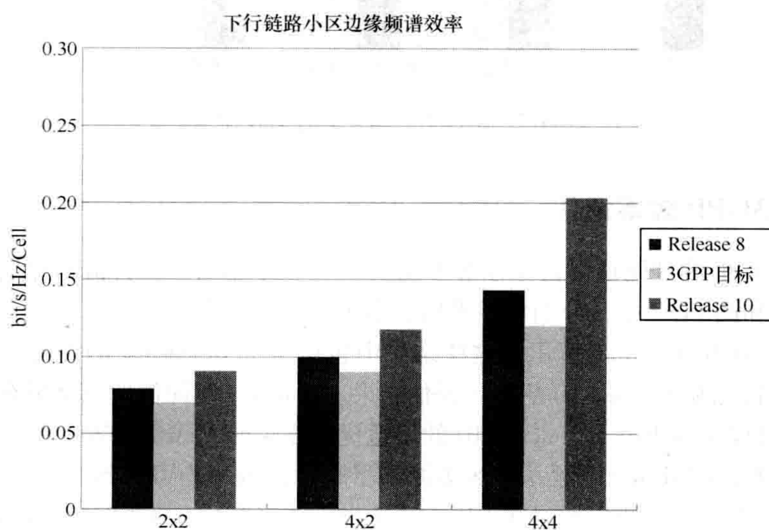


图 11.9 下行链路小区边缘频谱效率（3GPP Case 1）

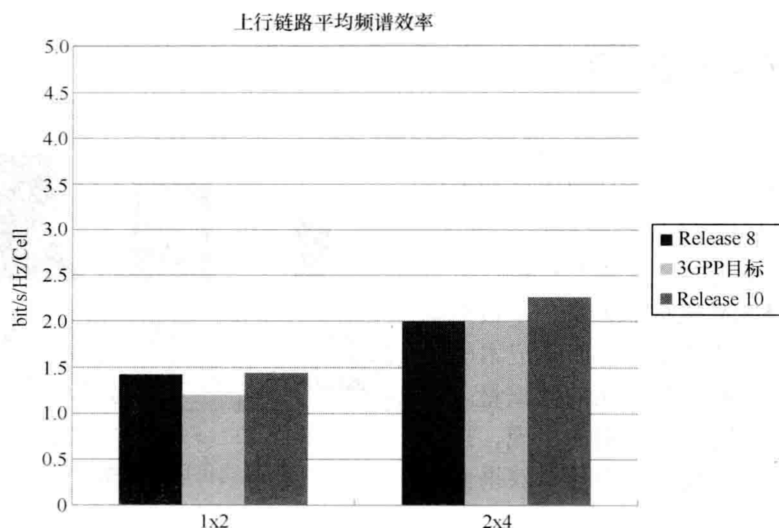


图 11.10　上行链路小区平均频谱效率（3GPP Case 1）

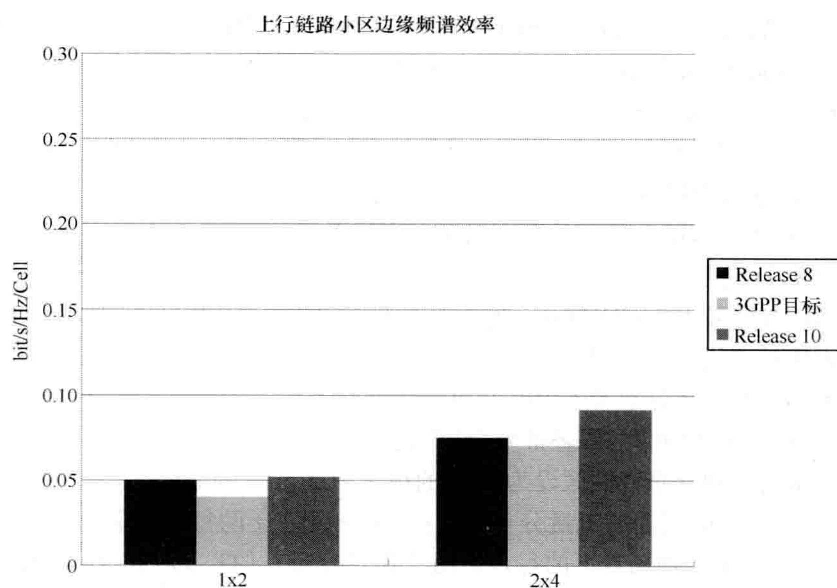
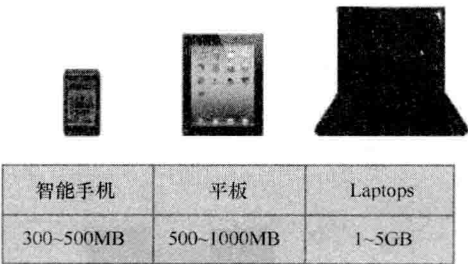


图 11.11　上行链路小区边缘频谱效率（3GPP Case 1）

上行链路频谱效率可以通过在基站侧安装 4 根天线获得显著的提升。4 根天线带来的性能增益约在 60% ~80%。该增益绝大部分可在 Release 8 下获得，Release 10 仅可带来约 10% ~20% 的额外增益。

11.4　网络容量和覆盖

新终端设备的使用大大增加了数据业务的使用量。典型的月均用户数据使用量如图 11.12 所示。屏幕尺寸越大，数据使用量也越大。智能手机用户每月消耗 300～500M 数据业务量，平板电脑用户消耗更多的数据量，而笔记本电脑用户通常每月消耗数千兆的数据量。数据使用量也会随着新应用的出现，接入速率的提高和更高质量的显示效果而不断增加。



智能手机	平板	Laptops
300~500MB	500~1000MB	1~5GB

图 11.12　不同类型终端的典型月均每用户数据用量

下面的计算估计了 LTE 和 LTE-Advanced 无线网络在典型网络配置下可提供的最大容量。假设如下：

① 每运营商的可用 LTE 频谱假设为 2×50MHz（FDD）。在欧洲采用的典型频点是 800，1800 和 2600MHz 频段。另一种场景则假设两倍的频谱资源：每个运营商 2×100MHz，考虑从 3.5GHz 获取更多的频谱资源。

② 仅考虑下行链路流量，这是因为典型业务下行链路流量比上行链路要高出 5～10 倍。这里假设网络容量仍然受限于下行链路。

③ 假设 10 万基站，每基站三个扇区。

④ 2000 万用户。

⑤ LTE 假设采用 2×2MIMO，频谱效率为 2.7bit/s/Hz/小区，LTE-Advanced 采用 4×4MIMO，频谱效率为 4.7bit/s/Hz/小区。

⑥ 宏小区的扇区分裂带来 50% 的频谱效率增益。

⑦ Small Cell 异构网络部署带来 250% 的容量增长。

⑧ 流量的地理分布特性假设为 15% 的扇区承载 50% 的流量。

⑨ 考虑 24 小时周期的流量分布特性：忙时承载 7% 的每日流量。

图 11.13 给出五种场景下的每月每用户提供容量。LTE 2×50MHz 可提供每月每用户 5GHz 流量，满足目前的应用模式。LTE-Advanced 可利用现有蜂窝网络进一步提供 10～15GB 流量。如果运营商在热点需求区域部署 Small Cell，可提供容量将提升至 50GB。如果运营商可获得更多的频谱资源，容量提供能力将增长至每月单用户 100GB，近似于目前使用量的 100 倍。

网络覆盖是提供更高的数据速率所面临的另一个挑战。从终端侧或基站侧增加额外的发射功率目前来看是基本不可能的。提升接收机的灵敏度同样也不大可能，

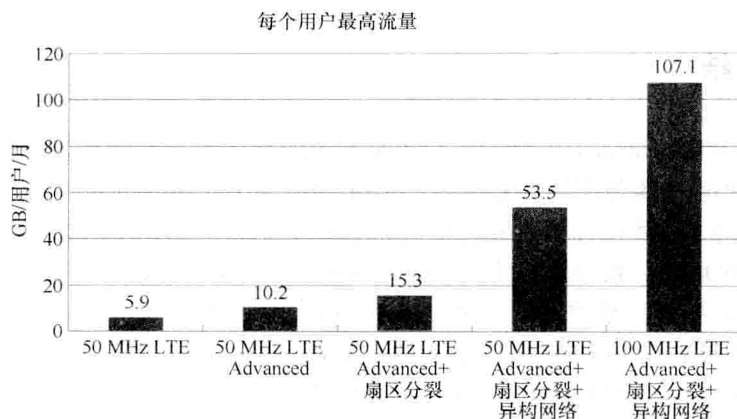


图 11.13 每月每用户无线容量

因为噪声系数已经接近于理论极限。提高覆盖的主要解决方案将是部署更多的基站，更多的天线和实现多小区的联合接收。我们假设初始的 LTE 宏网络设计目标是提供 1Mbit/s 的小区边缘下行链路吞吐量和 100kbit/s 的上行链路吞吐量（见图 11.14）。采用扇区化估计可进一步将小区边缘用户速率提升 50%，4 根天线 MIMO 可提升 100%，COMP 技术可提升 30%。这些解决方案结合在一起，可以将小区边缘数据速率提高 4 倍。通过增加更多的蜂窝小区可以更实质地带来数据速率的提升。如果我们新增 3 倍小区数量，小区边缘的链路预算可以改善 10dB，从而可以 10 倍级提升噪声受限的覆盖范围。如果有 10 倍以上的同信道小区，可提高小区边缘下行链路数据速率至超过 100Mbit/s，上行链路数据速率达到数十 Mbti/s。

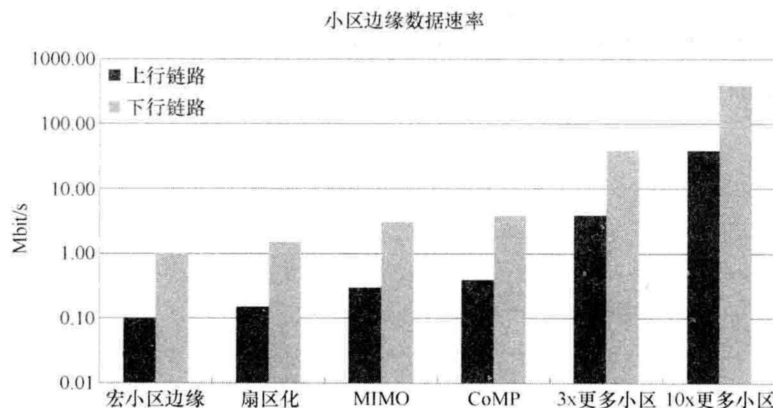


图 11.14 无线覆盖提升

11.5 小结

ITU为IMT-Advanced技术定义了多种不同传播环境下的峰值数据速率、平均频谱效率和小区边缘效率等性能指标。3GPP也针对LTE-Advanced定义了其性能要求。本章讨论了这些目标要求和相应的仿真评估结果。LTE-Advanced由于采用了时频空多维领域的一系列新特性，包括MIMO、异构网络和更宽带宽技术，带来了性能的进一步提升。系统评估结果显示Release 10的LTE-Advanced达到并超过了ITU和3GPP所定义的所有性能要求。LTE-Advanced的频谱效率相比Release 8性能有了进一步提升，尤其在4×2和4×4 MIMO传输的情况下。宏蜂窝频谱效率可达到4.7bit/s/Hz/小区，对应的在40MHz带宽下可达到约200MHz的平均传输速率。

网络级的评估结果显示，基于典型运营商频谱分配情况并采用现有的基站密度，通过LTE-Advanced技术可具备月均每用户10GB流量的提供能力。利用宏小区扇区化、异构网络和新增频谱分配资源可使月均流量提升至100GB以上。但大多数场景下数据速率将仍受限于覆盖能力，目前来看仍需通过增加更多的基站来达到所需的链路预算。

参考文献

1. Report ITU-R M.2134 (2008) Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s).
2. Report ITU-R M.2135-1 (2009) Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced.
3. 3GPP TR 36.913 V8.0.1 (2009-03) Technical Report, Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced).
4. 3GPP TR 36.912 V10.0.0 (2011-03) Technical Report, Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced).
5. 3GPP TR 36.814 V9.0.0 (2010-03) Technical Report, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects.

第 12 章　Release 11 及 Release 12 展望

Timo Lunttila, Rapeepat Ratasuk, Jun Tan, Amitava Ghosh and Antti Toskala

12.1　简介

本章主要介绍目前 3GPP 正在研究的 Release 11 及 12。首先简单介绍 Release 11 版本中的相关研究课题。随后对除 CoMP（在第 13 章单独介绍）以外的所有 3GPP Release 11 的议题进行阐述，其中包括增强型 LTE UE 接收机、载波聚合增强、低成本机器类通信（Machine Type Communication MTC）及下行链路 MIMO 增强。最后，本章对于面向 Release 12 的相关议题进行说明。

12.2　LTE-Advanced Release 11 内容

3GPP 已经完成了 LTE-Advanced 的第一个版本，Release 10。在 Release 11 中又开始了大量的新的研究项目和工作项目。在 Release 11 中最大的课题应该是 CoMP。CoMP 课题最初在 LTE-Advanced 中研究，随后延迟到 Release 11 以保证所有之前确定的内容都能够得到讨论。CoMP 的相关思路及性能将在第 13 章中进行详细的讨论。3GPP Release 11 的主要工作项目在图 12.1 中给出。图 12.1 中也给出了各个工作项目希望增强的内容，例如网络容量等。在图 12.2 中给出了 Release 11 版本中的研究项目。未来仍会有部分研究项目在 Release 11 中进行研究。这些研究项目将会在 Release 11 中完成，具体的功能特征应会在未来版本中引入。在 3GPP TSG RAN Release 11 的工作中不仅包含图 12.1 中所示的课题，还包含之前在 LTE Release 8 和 9 中延续的课题。这些课题都不是 LTE-Advanced 相关的特性。在 3GPP Release 11 的讨论中 LTE UE 性能增强方面的议题最被网络运营商关注。在 12.3 节中对于增强型接收机对于系统性能的提升进行分析。低成本 MTC UE 的讨论并非为了提升网络容量或数据传输速率，而是通过分析如何降低 MTC 终端的成本以更有效地将 LTE 引入广大的机器类通信市场。对于低成本 MTC UE 的讨论在 12.4 节中给出。对于多种小数据包增强的研究旨在减小“一直在线”的 LTE 智能手机的功耗并同时减少网络的信令开销。载波聚合增强通过增加新的载波类型来提升网络下行链路容量，其将在 12.5 节中讨论。在 12.6 节中对于增强型下行链路物理控制信道进行讨论，本工作项目旨在提升下行链路控制信令的灵活性及传输性能。另外，

在 Release 11 中还有其他对于异构网络进行增强的相关研究课题，相关问题已在第 8 章中进行阐述。

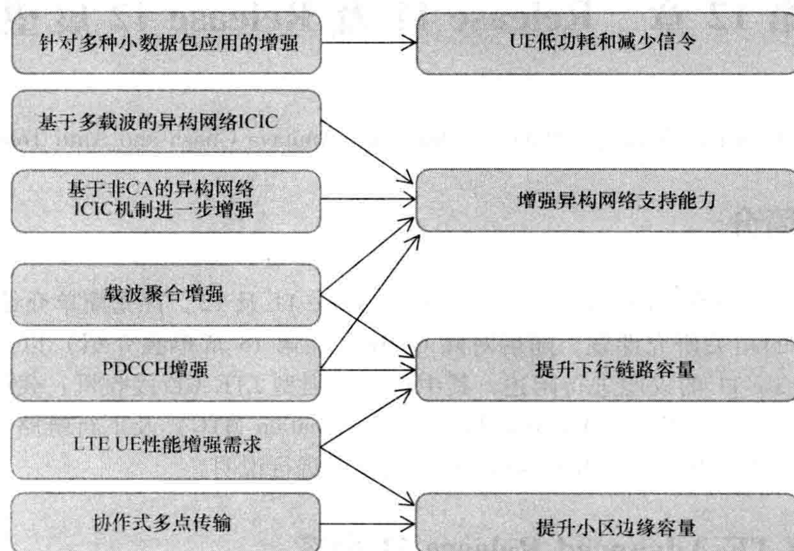


图 12.1　LTE-Advanced Release 11 主要工作项目

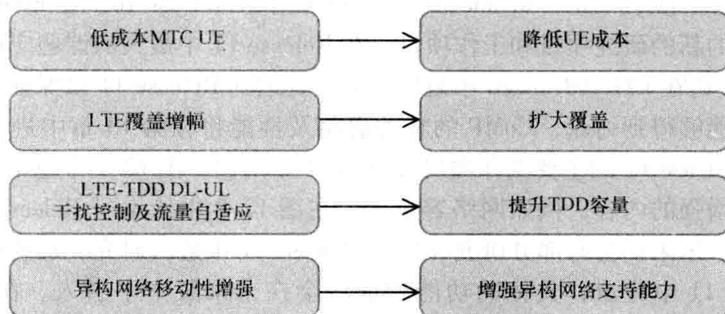


图 12.2　LTE-Advanced Release 11 研究项目

本章对于 Release 11 中 LTE-Advanced 特性增强的主要方面进行说明，但是对于之前 Release 特性的增强不会过多的涉及，例如 SON。对于其他较为相似的课题，例如最小化路测及家庭基站的增强等将不会在本章讨论。正如在第 2 章中所提，3GPP Release 11 的所有议题在 2012 年底结束。

12.3　增强型 LTE UE 接收机

增强型 LTE UE 接收机与 HSPA UE 接收机类型。虽然 3GPP 已经为支持增

强型接收机的 UE 定义了基本型以满足性能的需求，但是这并不表示禁止其他特殊的 UE 接收机类型。增强型接收机的基本型定义为采用干扰抑制合并（Interference Rejection Combining，IRC）技术的 MMSE 接收机。MMSE-IRC 接收机通过在空间上对于最强干扰进行删除来提升接收性能。具体对于 MMSE-IRC 的说明可以参见参考文献［1］。在图 12.3 中对于 MMSE-IRC 接收机的操作过程进行描述。

图 12.4 给出了采用增强型 UE 接收机来解调 PDSCH 信号的基本框图。在接收端采用 MRC 和 IRC 准则。从每一个天线接收到的信号下变频到基带。对于每一个符号，首先去掉 CP 然后针对每一块采样点进行 FFT 变换。信道估计模块基于 CRS 和 DRS 进行信道估计。基于 MMSE-MRC 和 MMSE-IRC 的算法采用复杂信道估计对于接收信号进行均衡。均衡后的符号基于调制方式计算 LLR 值。LLR 经过反交织后经过 Turbo 译码器获得译码符号。

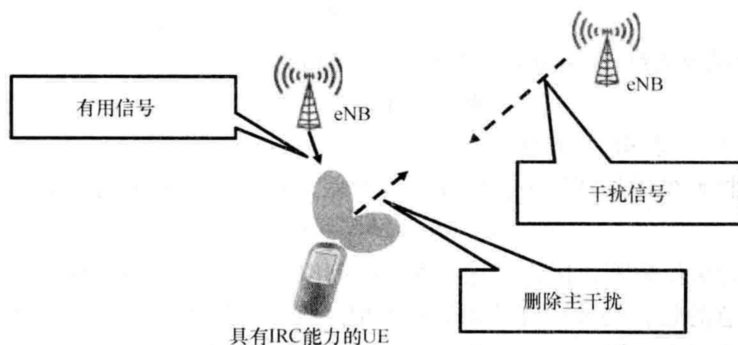


图 12.3　MMSE-IRC 接收机原理

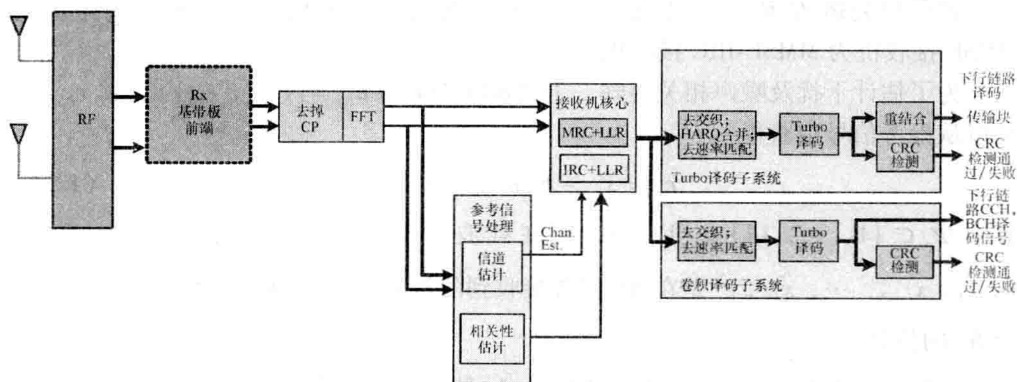


图 12.4　UE 接收基本框图

12.3.1　MMSE-MRC和MMSE-IRC方案简介

定义$x_{i,j,m}$为FFT输出的第i（$1 \leqslant i \leqslant 14$）个OFDM符号第$j$（$1 \leqslant j \leqslant N$）个子载波及第$m$个接收天线上的采样信号。其中，$N$是分配给UE的载波数量。接收信号可以表示为

$$\boldsymbol{x}_{i,j} = \boldsymbol{h}_{i,j}s_{i,j} + \boldsymbol{v}_{i,j} \tag{12.1}$$

其中$\boldsymbol{x}_{i,j} = [x_{i,j}, 1, x_{i,j}, 2, \cdots, x_{i,j}, M]^T$，$\boldsymbol{h}_{i,j} = (h_{i,j,m,k})_{M \times K}$，$h_{i,j,m,k}$是在第$k$个发送天线和第$m$个接收天线间第$i$个数据符号第$j$个子载波上的有效信道增益。$\boldsymbol{s}_{i,j} = [s_{i,j,1}, s_{i,j,2}, \cdots, s_{i,j,K}]^T$，$s_{i,j,k}$是在第$k$个发送天线上第$j$个子载波和第$i$个OFDM符号上的发送信号。$\boldsymbol{v}_{i,j} = [v_{i,j,1}, v_{i,j,2}, \cdots, v_{i,j,M}]^T$，$v_{i,j,m}$是干扰和噪声的混合信号。假设有$K$个发送天线和$M$个接收天线。

使用MMSE准则，估计信号可以表示为

$$\hat{s}_{i,j} = \boldsymbol{h}_{i,j}^H(\boldsymbol{h}_{i,j}\boldsymbol{h}_{i,j}^H + \boldsymbol{R}_{vv,i,j})^{-1}\boldsymbol{x}_{i,j} \tag{12.2}$$

第M个接收天线上接收噪声和干扰的空间相关矩阵$\boldsymbol{R}_{vv,i,j}$表示为

$$\boldsymbol{R}_{vv,i,j} = E[\boldsymbol{v}_{i,j}\boldsymbol{v}_{i,j}^H] \tag{12.3}$$

其中E［.］表示为期望值。

假设接收天线接收到的干扰和噪声为方差为σ_n^2，的高斯信号，$\hat{\boldsymbol{s}}_{i,j}$可以表示为

$$\hat{\boldsymbol{s}}_{i,j} = \boldsymbol{h}_{i,j}^H(\boldsymbol{h}_{i,j} + \boldsymbol{h}_{i,j}^H + \sigma_n^2\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{x}_{i,j} \tag{12.4}$$

其中$\boldsymbol{I}$为单位矩阵，接收机称为MMSE-MRC接收机或者MMSE接收机[2]。

需要注意的是，仍可以有其他的基本型接收机。例如，如果在接收天线端的接收噪声建模为具有不同房产的高斯信号，协方差矩阵$\boldsymbol{R}_{vv,i,j}$可以表示为对角元素不等的对角矩阵。另一种rank-1的接收机类型为MRC接收机[2]。

如果相关矩阵$\boldsymbol{R}_{vv,i,j}$基于接收天线接收到的真实干扰进行建模，则对应的MMSE接收机为MMSE-IRC接收机。

为了估计干扰及噪声相关矩阵，干扰加噪声向量$\boldsymbol{e}_{i,j} = [e_{i,j,1}, e_{i,j,2}, \cdots, e_{i,j,M}]^T$可以从参考信号中获得

$$\boldsymbol{e}_{i,j} = \tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} - \hat{\boldsymbol{h}}_{i,j}\boldsymbol{d}_{i,j}, (i,j) \in \psi_{\mathrm{p}} \tag{12.5}$$

其中$\Psi_{\mathrm{p}} \subset \{1, \cdots, 14\} \times \{1, \cdots, \mathrm{N}\}$在载波和子帧上的参考信号集合。$\tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} = [\tilde{x}_{i,j,1}, \tilde{x}_{i,j,2}, \cdots, \tilde{x}_{i,j,M}]^T$是在RS位置接收到的符号。$\hat{\boldsymbol{h}}_{i,j}$是在非理想信道估计下对于$\hat{\boldsymbol{h}}_{i,j}$的估计。

在第i子帧第j子载波上的参考信号$\hat{\boldsymbol{d}}_{i,j}$是长为$K$的向量。在基于CRS传输的情况下，RS信号不会进行预编码，预编码矩阵仅应用于数据信号。为了获得正确

的干扰和噪声信号样值，在信道估计是需要利用预编码矩阵。在基于 DM-RS 传输的情况下，RS 信号与传输的数据信号一起经过预编码。

干扰加噪声信号的相关矩阵可以计算为

$$\hat{\boldsymbol{R}}_{vv} = \frac{1}{|\psi_{\mathrm{P}}|}\sum_{(i,j)\in\psi_{\mathrm{P}}} \boldsymbol{e}_{i,j}\boldsymbol{e}_{i,j}^{H} \tag{12.6}$$

其中 $|\psi_{\mathrm{P}}|$ 是 RS 信号的数量。

12.3.2 采用 IRC 的 UE 接收机性能及其与 MRC 接收机的对比

本节对于 MMSE-MRC 和 MMSE-IRC 接收机性能进行对比分析。对比分析考虑下行链路采用 TM6 和 TM9 方式。由于 UE 接收天线数量的限制，在评估 IRC 性能时采用 rank-1 传输方式。对于基于 CRS 传输方式，采用 TM6（或者 rank-1 的 TM4）模式。对于基于 DM-RS 的传输方式采用 rank-1 的 TM9 模式。假设系统带宽为 10MHz。在第 3 章的表 3.1 中对于下行链路传输模式进行了总结。具体的仿真假设在表 12.1 中给出。

表 12.1 增强型接收机性能仿真参数假设

参　数	场景 1（基于 CRS 的传输方式）	场景 2（基于 DM-RS 的传输方式）
载频	2GHz	
系统带宽	10MHz	
服务小区传输模式	TM6	单层 TM9 传输
干扰小区传输模式	TM6	TM9
MIMO 配置	2×2 低相关性	4×2 低相关性
目标和干扰小区的信道模型和多普勒频率	EVA 3km/h，在不同的小区间采用不同的信道仿真种子	
CRS 配置	非冲突 2 根天线端口	
CSI-RS 配置	无	4CSI-RS 天线端口及 5ms 周期
有用信号格式	宽带 PMI	
H-ARQ	8 个 HARQ 进程，最大 4 次重传	
PCFICH	CFI = 2	
资源分配	50RB	

图 12.5 给出 MMSE-MRC 和 MMSE-IRC 接收机传输速率的性能对比。仿真中考虑在采用 MCS 7、8、9[3] 及传输模式 TM6。假设发送和接收端都采用 2 天线方式，且发送信号和干扰噪声的互相关性较低。

相同地，图 12.6 给出了 4 发 2 收情况下采用 TM9 及 MCS 10、11、12 的情况。在仿真中假设存在两个干扰源。其中，主干扰源 DIP1 = −3.3dB，第二干扰源 DIP2 = −5.8dB。可以看到，在 TM6 QPSK 条件下，采用 MMSE-IRC 可以比 MMSE-

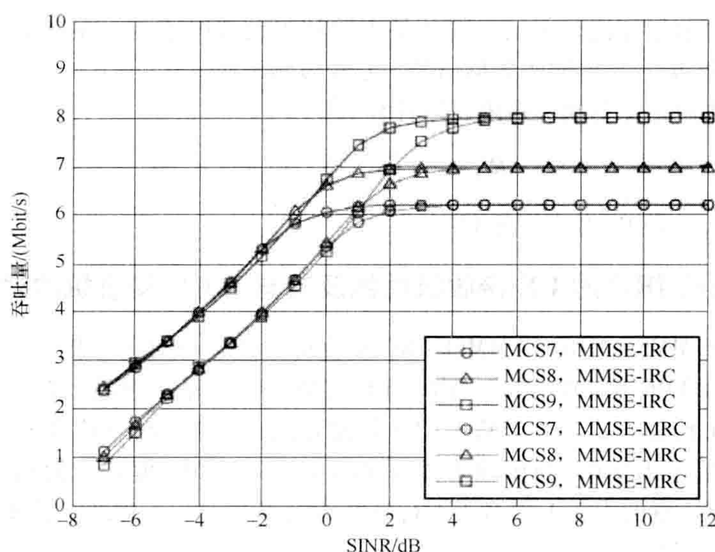


图 12.5 吞吐量与 SINR（MMSE-MRC 及 MMSE-IRC 接收机，TM6，MCS-7、8、9，2×2 天线配置）

MRC 多获得 2dB 的增益。在 TM9 16QAM 条件下 MMSE-IRC 可以获得 1dB 增益。可以看到 MMSE-IRC 获得的增益与 DIP 的分布有关。由于 TM9 采用 4 根天线可以获得赋形增益，这使得采用 IRC 的合并增益减小。

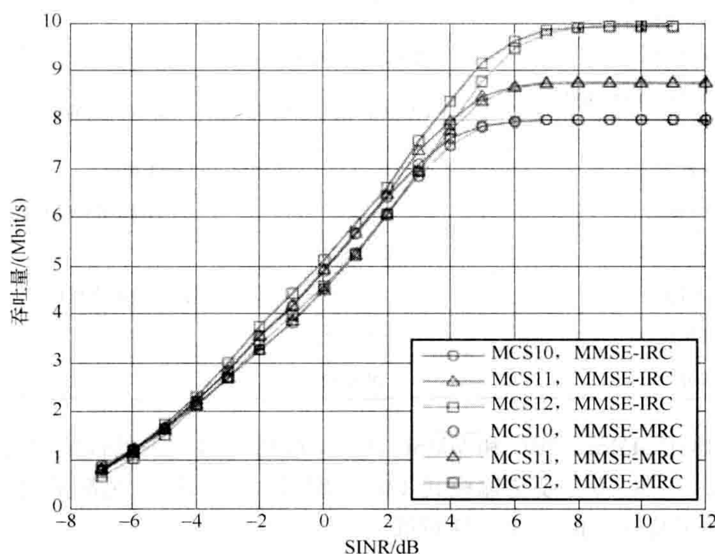


图 12.6 吞吐量与 SINR（MMSE-MRC 及 MMSE-IRC 接收机，TM9，MCS-10、11、12，2×2 天线配置）

12.4 机器类通信

在 3GPP TSG RAN 的讨论中，机器类通信获得了较大的关注。这类通信方式不需要人类的参与可以看作设备和服务器或者设备与设备的数据通信。机器类通信的示例包括传感器、保密与公共安全、跟踪、付费、监测、远端管理与会话及智能电网等。典型的机器类通信的特征为低成本、低移动性、高延时容忍、大量终端、不频繁小数据传输、高可靠性、时间控制操作及组通信等。

随着 LTE 网络的广泛部署及之前网络的退网，如何使 LTE 网络支撑 MTC 设备是目前运营商关心的问题。假设在没有覆盖盲区的情况下，LTE 网络必须比之前 GSM、UMTS 网络能提供相当或者更大的覆盖范围。这使得 LTE 部署可以使用现有蜂窝网络基站。特别地，由于 UE 发射功率的限制，蜂窝网络覆盖受限于上行链路。表 12.2 给出了 LTE 网络与 UMTS、CDMA1x 及 GSM 网络在服务 MTC 终端时上行链路预算的对比关系。从表 12.2 中可以看到，LTE 可以提供与现有系统相当的覆盖范围。因此，在现有网络退网情况下，LTE 网络不会造成覆盖盲区。

表 12.2 链路预算对比（上行链路）

上行链路	LTE (Release 8)	UMTS (HSUPA)	CDMA1x (1×EV-DO)	GSM
UE EIRP 功率/dBm	23	23	23	33
发射天线增益/dBi	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
EIRP/dBm	21.0	21.0	21.0	31.0
eNB 接收机天线增益/dBi	17.0	17.0	17.0	17.0
馈线损耗/dB	1.0	1.0	1.0	1.0
噪声系统/dB	5.0	5.0	5.0	5.0
热噪声密度（kT）/（dBm/Hz）	-174.0	-174.0	-174.0	-174.0
带宽（kHz）	360.0	3840.0	1250.0	200.0
SINR/要求/dB	-7.1	-17.2	-12.4	7.0
接收机灵敏度预留差额	-136.5	-136.3	-136.4	-125.0
软切换增益/dB	0.0	2.0	2.0	0.0
对数正态衰落预留差额 /dB	5.6	5.6	5.6	5.6
干扰预留差额/dB	1.0	3.0	3.0	1.0
建筑穿透损耗/dB	18.0	18.0	18.0	18.0
人体穿透损耗 /dB	2.0	2.0	2.0	2.0
系统整体预留差额	26.6	26.6	26.6	26.6
最大允许路损	130.9	130.7	130.8	129.4

一般地，MTC 业务一般是以上行链路传输为主。信息一般从 MTC 终端向网络

传输。在下行链路方向上，一般是控制信息、确认信息，因此通过组的方式来进行更新是更加明智的选择（例如通过分组地址或者 MBFN 方式）。

图 12.7 给出了健康监测传感器终端低速业务的上行链路容量分析。仿真中业务采用家庭检测业务模型，每分钟发送 128B 信息。仿真分别对于城区和郊区宏小区部署场景进行评估分析。在城区宏小区场景下 eNB 的站间距为 500m，郊区宏小区场景 eNB 站间距为 1732m。从图中可以看到，LTE 网络可以提供足够的 MTC 终端业务传输。基于归一化的系统带宽，在郊区宏小区场景下，每 MHz 可以服务将近 30000 个终端传输；在城区宏小区场景下，每 MHz 可以提供近 48000 个终端传输。

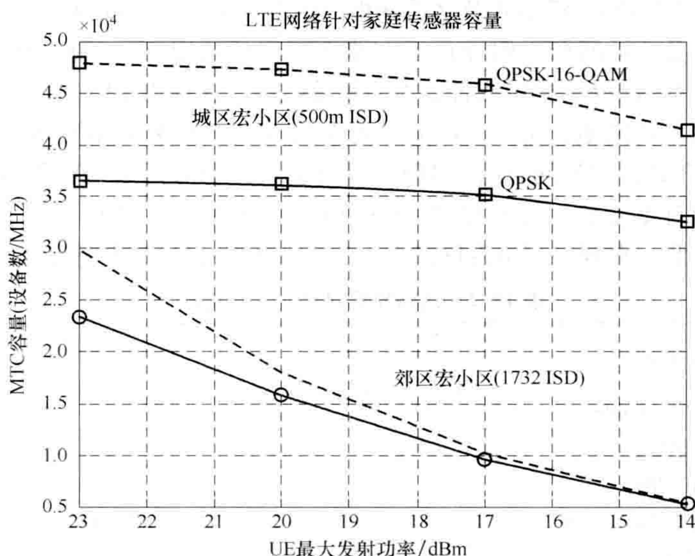


图 12.7　对于低速率家庭传感器终端的上行链路容量[4]

在现有网络中已经增加了一些简单的方法以保证在特殊情况下网络不会出现拥塞。同时，3GPP 也正在讨论如何相对于 Release 8 Cat 1UE 降低 M2M 终端的成本。这个课题的源自于 GSM 终端的低成本。课题的相关内容包括：

① Release 8 UE 将支持 2 根接收天线作为最基本要求，这是 UE 至少存在两个 RF 接收链路及接收天线。如果减少一个 RF 接收链路及接收天线，将有效降低 UE RF 成本。通过这种方式，基带不需要进行分集或者复用的处理，也可降低对 UE 基带处理能力的要求。最终由于对各处理单元处理能力需求的降低，例如信道估计及内存需求，可有效降低 UE 成本。从性能角度看，虽然减少一个 RF 单元会降低下行链路的容量，但是下行链路容量仍高于上行链路。因此这样的方式不会造成 MTC UE 上行链路容量受限。但是，这种方式会造成系统容量的下降，特别是对于在混合业务场景下，MTC UE 会使用更多的下行链路资源。具体系统下行链路的容

量损失与 MTC 占用的下行链路资源数量及系统的业务负荷有关。从系统覆盖的角度看，虽然仅有一根接收天线，但是系统的上行链路覆盖不会受影响，因此这种方式对于系统覆盖不会产生影响。

② 在支持 20MHz 系统带宽方面，主要研究相比较于针对 MTC UE 对网络侧的修改与减小系统带宽可以带来 UE 开销的降低。降低系统带宽带来的增益主要在基带处理单元成本的降低，包括 FFT、ADC/DAC、UL/DL 信道处理单元及所需内存。在上行链路上，可以将 MTC 的带宽现在在系统带宽的一部分范围之内。但是，在下行链路由于控制信道（PHICH、PCFICH 及 PDCCH）占用整个带宽，较难将 MTC UE 的带宽限制在一定范围内。因此，为了使窄带宽低成本的 MTC UE 可以在宽带系统上传输需要协议上的修改。

③ 降低峰值数据速率。目前 UE 支持的最小峰值数据速率（Cat 1 UE）为下行链路 10Mbit/s 上行链路 5Mbit/s。在一些 MTC 业务中，例如测量业务，其数据传输量极为有限，没有必要采用如此高的数据传输速率的支持。为降低 MTC 终端的数据传输速率，可以考虑如下方式：仅采用 QPSK 调制、降低 TBS 数量、减少 HARQ 进程等。这些都可以节省基带和 RF 模块的开销。其中一些技术，例如减小 TBS 数量、减小 HARQ 进程数并不会造成系统容量和覆盖的降低，且对于基站侧的修改较小；而仅采用 QPSK 的调制方式会降低系统整体性能。从图 12.7 中可以看到，仅采用 QPSK 调制在郊区和城区场景下会造成上行链路容量 19% 和 24% 的降低。

④ 目前，UE 的最大发射功率定义为 23dBm，降低对于 UE 发射功率的需求也是减小 UE 开销的有效手段。降低 UE 发射功率将会影响网络上行链路的覆盖范围，这些可以通过 HARQ 技术及 subframe 绑定来解决。从图 12.7 中可以看到，在城区宏小区场景下由于小区半径较小，系统干扰受限，降低 UE 发射功率对于系统容量的影响较小。在这种情况下，将 UE 发射功率降低 6dB 仅造成上行链路系统容量 5% 的下降。在郊区宏小区场景下，小区半径较大，系统噪声受限，减小 UE 发射功率造成系统容量下降十分明显。将 UE 功率降低 6dB 会造成上行链路容量下降 65%。在小区半径较大时，减小 UE 发射功率会造成网络覆盖的空洞，小区半径的减小和 UE 上行链路功率的减小成正比。

⑤ 在 GSM 网络中，半双工的工作方式使得 UE 成本较低。如果 FDD LTE 可以采用半双工的方式，UE 将不需要同时进行上行链路发送和下行链路接收的操作（如 TDD），这将不需要 UE 具有双工滤波器模块。从网络角度看，半双工的工作方式需要 eNB 在调度时考虑 UE 发射和接收能力的限制。在这种情况下，调度器需要保证资源的调度与 UE 半双工的工作方式不发生冲突。这要求调度器在进行数据和控制信息调度时同时考虑两个方向上的情况。例如，下行链路调度器需要了解上行链路传输的情况（比如 CQI，ACK/NACK、半持续调度 PUSCH 及 PUSCH 重传）。同样地，上行链路调度器需要知道未来下行链路 ACK/NACK 或者半持续调度的情况。这会造成调

度器极大的负担和复杂度。另外，与 TDD 相同，工作在半双工状态的 UE 需要保护时间已完成不同方向上的接收和发送的切换。这将会对标准产生较大的影响（比如增加保护间隔或者符号）或者进一步限制调度器来保证足够的收发切换时间。

表 12.3 给出了前述所有方案可能对于 UE 成本的节省。从表中可以看到，单根天线接收、半双工 FDD 和减小发射带宽提供最多的成本节省。仅保留单个 RF 可以将 LTE 终端成本降低 14% ~18%。这对于系统的容量和覆盖会造成较小的影响，但是对于功率消耗将会有明显的降低。因此，低成本 MTC 终端应该配置单个 RF。表 12.3 给出了相比较与 Release 8 Cat1 终端，低成本终端成本的降低。Release 8 Cat1 UE 的具体参数已在第 3 章中给出了详细说明。

表 12.3　不同技术对于 UE 成本的降低[4]

相关技术方案	估计节约成本/（%）
单接收天线	14 ~ 18
降低最大发射功率	1 ~ 3
半双 IFDD	9 ~ 12
降低 UE 最大带宽	6 ~ 10
降低峰值数据速率	5 ~ 7

虽然半双工可以降低 UE 成本，但是它对于实现现有网络的修改较大。因此，半双工不应该成为低成本 MTC 终端的强制需求。对于系统最大支持带宽的降低也会造成现有协议的修改，因此在采用此方案是需要注意其带来的影响。

降低最大发射功率可以将 UE 成本节省 1% ~3%。在宏小区场景下，这种方案会造成系统容量降低及小区半径的减小。因此，成本的降低与其造成的损失不成正比。降低峰值数据速率可以将 UE 成本节约 5% ~7%。一些方案对于系统的容量和小区覆盖没有影响，且对于 eNB 实现的修改也较小。这些方案应该在低成本 MTC 设备中采用。在该课题的 SI 结束后，WI 将在 2012 年第二个季度开始。

在参考文献［6］中可以看到，在 UE 的成本中 RF 占总成本的 40%，基带模块占 60%。在 RF 部分，RF 发射模块占主要成本。从表 12.4 中可以看到 RF 的主要成本在混合器、本地晶振和低噪放大器。从对于基带模块的评估中可以看到，其成本主要在接收处理部分。当采用 MIMO 时，接收部分占基带模块成本的 40%。其成本明显高于 ADC/DAC、FFT/IFFT、Turbo 编码、HARQ 缓存及其他基带功能。

表 12.4　UE RF 模块成本划分[6]

不 同 部 分	占 RF 成本比例/（%）
RF 放大器	25 ~ 30
RF 发射接收器	40 ~ 50
双工器/转换器	15 ~ 25
其他	0 ~ 10

12.5　载波聚合增强

基于 Release 10 中对于载波聚合的讨论，在 Release 11 中的 WI[7] 主要考虑对于载波聚合技术的增强。作为 WI 的一个部分，下面的内容将在 Release 11 中进行讨论。在本节后续内容中将对相关问题进行详细说明。

① 支持多个上行链路定时超前值；

② 带内非连续载波聚合；

③ 支持 TDD 上行链路和下行链路带间载波聚合，包括在不同的带间采用不同的上、下行链路子帧配置。

④ 新载波类型（这部分将在 Release 12 中完成）

对于上行链路多个定时超前值支持的主要目的是为了支持在不同频带上采用不同转发器时的场景。这个场景在第 5 章中已进行讨论。由于转发器内部处理时延，当在两个上行链路上仅单条链路进行转发放大时，现有单个定时超前值无法满足系统需求。在 Release 11 中，MAC 层支持 eNB 向 UE 的每个上行链路传输频带提供不同的 UE 定时超前值。

带内不连续载波聚合在 Release 11 中作为载波聚合的主要工作进行讨论。为了支持带内不连续载波聚合，需要在不同的载波之间保证 33dB 的临载波衰减[8]，如图 12.8 所示。由于双工滤波器仅对于整个频带进行滤波，UE 需要安装另外的滤波器或者两套接收 RF 设备，如图 12.9 所示。图中假设 UE 使用单根发送天线和单个上行链路载波。

支持 TDD 带间载波聚合及上、下行链路不同的子帧配置，这意味着支持这种载波聚合方式的 TDD UE 将具有 FDD 相同的在不同频带上同时进行上、下行链路传输的能力。

在 Release 11 中载波聚合课题物理层最大的改进是对新型载波类型的支持。新型载波类型主要在下行链路方向，而对上行链路操作基本没有修改。新型的非后向兼容载波类型已经在 Release 10 的讨论有所涉及，但是由于时间问题，并没有包含在标准中。Release 10 中讨论的最主要方案包括：

① 扩展载波：载波中不包含 CRS/PSS/SSS/PDCCH/PHICH/PCFICH 及 PBCH，相关移动性基于其他后向兼容载波。扩展载波必须是辅载波。

② 载波分割：作为一个后向兼容载波的带宽扩展。

在 Release11 中继续对于新型载波类型的讨论，且已经达成了一致要引入新型载波类型。Release 11 的新型载波类型设定为辅载波，因此，移动性操作基于后向兼容的主载波。另外，新型载波类型应该支持同步和非同步载波聚合场景，包括带

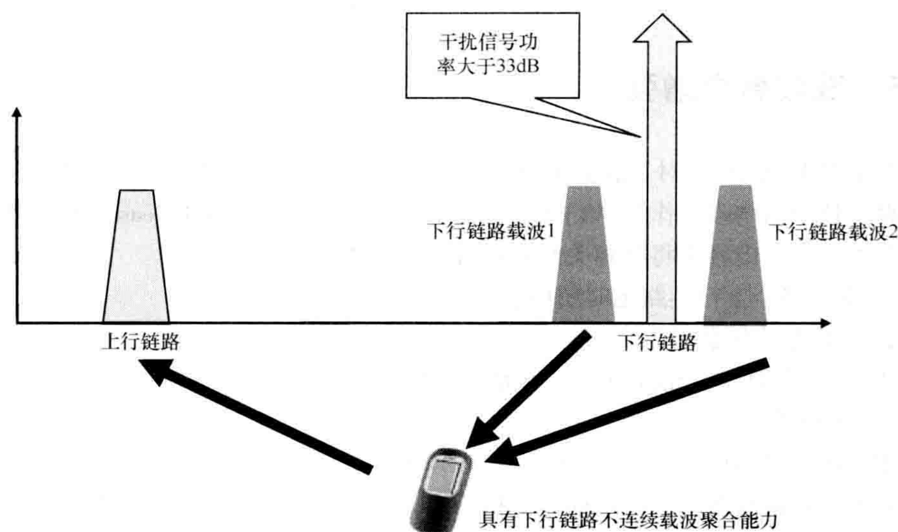


图 12.8　下行链路不连续带内载波聚合干扰示意图

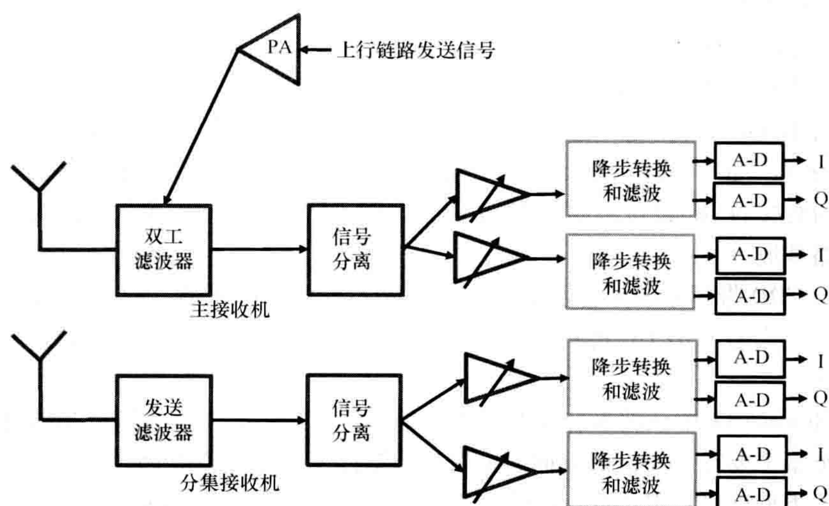


图 12.9　带内不连续载波聚合接收机示例

内和带外载波聚合。

引入新型载波类型的主要目的在于：

① 提升频谱效率：这主要通过降低信令及参考信号开销。

② 提升支持异构网络的能力：减少共享信道及信令可以有效地减小干扰，并且可以减少目前异构网络面临的相关问题。

③ 提升 eNB 功耗效率：当基站没有数据传输时动态地关掉特定的子帧，可以完全关闭 eNB 进而降低功率。

如果不采用 Release 8 中定义的公用参考信号，在新载波类型上需要采用 Release 10 中为 MIMO TM9 传输模式定义的 DM RS 来进行数据解调及 CSI-RS 进行信道状态信息的反馈。Release 11 的另一个特性，ePDCCH，在新载波类型中也扮演着重要的角色。ePDCCH 和载波间联合调度可以在新载波类型中删除下行链路共享信道（PDCCH、PHICH、PCFICH）。

新型载波类型中的主要问题已经在 3GPP 的讨论中解决，主要包括：减少 CRS 内容（保持在每 5ms 一次）或者采用 CSR-RS 及 DM RS 来进行信道信息反馈和解调，如图 12.10 所示。新型载波类型的讨论将在 Release 12 中结束。

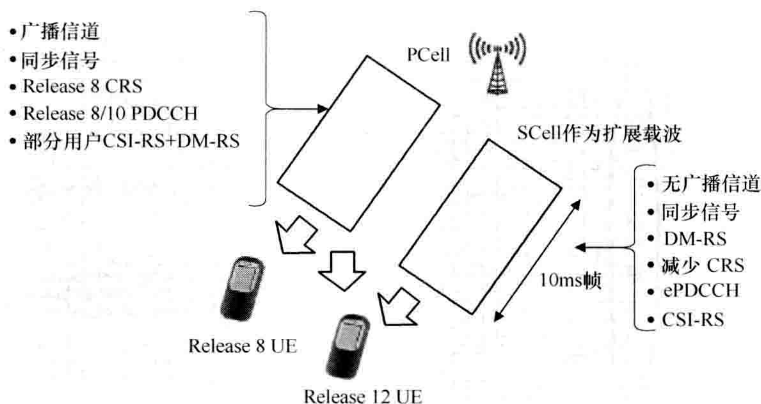


图 12.10 Release 12 中的新型载波类型

12.6 下行链路控制信道增强

下行链路控制信道增强主要研究增强 PDCCH 信道的容量及性能。相关研究工作从 2012 年已经开始。该研究内容主要关注下行链路，对于上行链路的修改较小。研究的目标如下：

① 支持更高的控制信道容量。这主要应用在 MTC 场景，以支持大量的 MTC 终端同时接入网络。

② 支持下行链路控制信道的频选调度和 ICIC。

③ 支持波束赋形：在 Release 10 中，下行链路控制信道是唯一无法从 eNB 增加天线来进行波速赋形及上行链路发送分集中获得分集增益的信道。

如第 3 章介绍，Release 8 中定义的 PDCCH 放置在整个带宽内，这样不需要像对 UE 数据一样对于控制信令进行频域调度及干扰避免操作。另外，当 eNB 配置多

于2根天线时，可以采用发射分集来提供更具鲁棒性的系统性能；但是，当eNB配置多根天线时，这种方式并非最优。

Release 11中ePDCCH课题的主要目的是允许控制信道可以同数据一样采用频域调度和波速赋形。假设理想的信道信息反馈及调度和链路自适应操作，相关调度信息也适用于控制信息。

Release 11中对于ePDCCH的研究希望能够使控制信息与数据信息采用同样的频域调度方案，UE从特定的PRB中获得控制信息，如图12.11所示。通过这种方式使控制信息可以从CSI反馈中获利，也为未来控制信息的干扰避免机制奠定基础。从图12.11中可以看到，现有的PDCCH仍将会采用以支持Release 10及之前的UE。相同地，控制信息可以使用precoding技术。

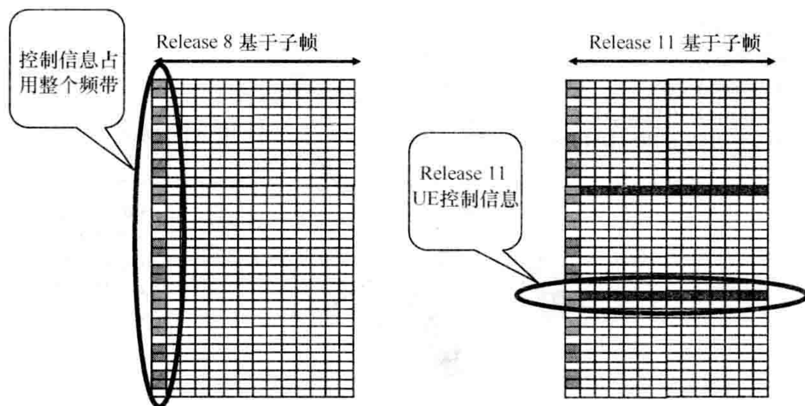


图12.11　下行链路控制信息中引入频域调度

基于上述目的，Release 11相关增强项目之间也有诸多联系。例如为自持新型载波类型而增加新的控制信息，为CoMP操作增加新的支持等。

12.7　Release 12 LTE-Advanced展望

3GPP决定在2012年中开始对于Release 12工作架构的讨论，3GPP TSG RAN论坛将在2012年中举行，以讨论3GPP TSG RAN Release 12及未来的相关讨论课题。下面列出了一些已经在之前的3GPP标准中提出的课题。需要注意的是，目前Release12的课题还是开放的状态，并不仅包含下面列出的内容。在Release 11中推迟的项目包括：

① 终端间通信在2011年第二季度已经包含在3GPP的需求中。其中一个主要的使用场景考虑距离较近的UE间进行大数据量的传输。另一个使用场景在公共安全场景下UE间不仅可以采用传统的蜂窝网络的通信方式，也可以进行UE间直接

通信。该课题在 RAN 方面的 SI 提案可以参见参考文献［9］。

② LTE 与 WLAN 动态链路切换（也称为 LTE/WLAN 载波聚合）旨在获得比核心网流量卸载更紧的互操作方式。将 WLAN 和 LTE 的无线侧进行融合的主要目的是为了网络性能的提升。与早控制 WLAN 行为，可以更有效地保证两张网络联合操作的增益。3GPP 在之前的版本中已经定义了不同的核心网方案，但是这些方案目前都还没有实际的部署。采用无线侧的融合技术将有可能将 LTE 和 WLAN 相结合而不对核心网产生影响。eNB 可以控制 UE 什么时候使用 WLAN。此 SI 的相关内容详见参考文献［10］。

③ LTE/HSDPA 载波聚合。在第 4 和 5 章节中对于 LTE 载波聚合进行讨论。但是，如果运营商同时运营 HSPA 和 LTE 网络，由于频谱资源的限制，运营商将较难采用 LTE 载波聚合来获得增益。例如，运营商计划部署 LTE 网络，在一个频带内利用 15MHz 频谱资源运营 HSDPA，在另外的 15MHz 频谱上部署 LTE。在这种情况下，运营商无法使用 LTE 载波聚合除非让出部分 HSPA 的部分载波。这样影响现有 HSPA 用户的性能，更不用说完全采用所有的 15MHz HSPA 频谱资源来运营 LTE。在采用相同的天线和带宽配置条件下，LTE 和 HSPA 系统的下行链路峰值数据速率几乎相同，如果 LTE 用户获得的峰值数据速率没有较大的变化，LTE 的市场化进程有可能会被延后。在参考文献［11］中给出了 LTE/HSDPA 下行链路载波聚合的优点：

④ 允许将两个无线网络的峰值数据速率进行合并以达到在 10MHz LTE 系统和 10MHz HSDPA 系统的上获得 100M 传输速率。

⑤ 在两个系统之间采用动态负载均衡。与 LTE 载波聚合相同，在 HSDPA 和 LTE 下行链路载波上以子帧级别进行负载均衡操作。

⑥ 通过联合调度获得 LTE 和 HSPA 系统同时部署时最高的频谱利用率。

⑦ 除峰值数据速率提升外，为小区边缘用户提供载波聚合增益。

⑧ LTE/HSDPA 载波聚合的示意图如图 12.12 所示。其使用单个上行链路来减少对于上行链路覆盖的影响及 UE 复杂度的增加。这与 Release 10 中 LTE 系统载波聚合假设相同，首先考虑下行链路的载波聚合，然后考虑上行链路两个传输链路的情况。该 SI 的相关内容可以参见参考文献［12］。

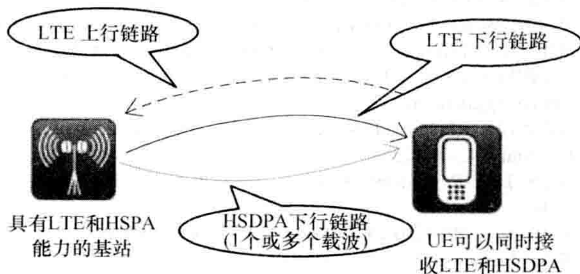


图 12.12　LTE/HSDPA 载波聚合示意（上行单链路）

在 Release 11 对于下行链路 MIMO 方案的增强中继续对于 CSI 反馈的增强方案进行研究。在 Release 12 的讨论中将关注增强反馈机制及潜在的新码字以提供更好

的空间和频率维度划分来提升4Tx MIMO方案的容量[13]。进一步的讨论将在参考文献［14］中。

3GPP Release 12的议程还未被正式确定，不过其将在2012年下半年确定。如第2章的阐述，Release 12将在2014年下半年结束。Release 11的内容将在2012年9月结束，相关协议将在2012年底或2013年初冻结。

12.8　小结

在本章中，我们对于LTE-Advanced Release 11和12的相关特性及展望进行分析。Release 11的主要工作是完成Release 10 LTE-Advanced框架中的相关工作。Release 12将会为LTE-Advanced系统提供新的特性。Release 11的相关讨论将在2012年底结束。随后将开始Release12的讨论，相关讨论将在2014年结束，具体时间仍需等待官方消息。Release11中的许多课题都是考虑增强LTE及LTE-Advanced系统的性能，并提升网络部署的灵活性。其旨在采用不同的网络拓扑结构以适应未来移动容量和速率增强的需求。

参考文献

1. 3GPP Tdoc R4-113528 (June 2011) Performance of Interference Rejection Combining Receiver for LTE NTT DOCOMO.
2. 3GPP Tdoc R4-121029 (February 2012) TP for Enhanced performance requirements for LTE UE SI, NTT DOCOMO.
3. 3GPP TS 36.213 (January 2012) Physical layer procedures, Table 7.1.7.1-1, v10.4.0.
4. Ratasuk, R.,Tan, J. and Ghosh, A.(2012)Coverage and capacity analysis for machine type communications in LTE.IEEE Vehicular Technology Conference, May 2012.
5. Holma, H. and Toskala, A.(2011) *LTE for UMTS*,2nd edn, John Wiley & Sons, Ltd.,Chichester.
6. 3GPP TR 36.888 (February 2012), Study on provision of low-cost MTC UEs based on LTE, Version 1.0.0.
7. 3GPP Tdoc RP-111115 (September 2011), LTE Carrier Aggregation Enhancements WID, Nokia Corporation.
8. 3GPP Technical Specification TS 36.101 (March 2012) UE transmission and reception.
9. 3GPP Tdoc RP-111093 (September 2011) Study on LTE device to device discover and communications – radio aspects, Qualcomm.
10. 3GPP Tdoc RP-111354 (September 2011) New study item proposal for dynamic flow switching between 3GPP-LTE and WLAN, 1 Intel.
11. 3GPP Tdoc R1-111060 (February 2011) Aggregating HSDPA and LTE carriers, Nokia Siemens Networks, Nokia.
12. 3GPP Tdoc RP-120120 (February 2012) New study item proposal for LTE and HSDPA Carrier Aggregation, Nokia Siemens Networks, Nokia.
13. 3GPP Tdoc RP-120413 (February 2012) Further Downlink MIMO Enhancement for LTE-Advanced, Alcatel-Lucent, Alcatel-Lucent Shanghai Bell.
14. 3GPP Tdoc RWS-120045 (June 2012) Summary of TSG-RAN workshop on Release 12 and onward, TSG-RAN Chairman.

第13章　CoMP发送与接收

Harri Holma，Kari Hooli，Pasi Kinnunen，Troels Kolding，
Patrick Marsch and Xiaoyi Wang

13.1　简介

LTE提供的峰值数据速率比平均的数据速率和小区边缘速率有大幅度的提高——提高了10倍以上。如此大幅地提高，其主要原因是小区间的干扰，它限制了信扰比，也因此限制了可达到的数据速率。GSM系统使用了较大的频率复用因子（例如每7个或12个小区复用相同的频率资源），而LTE使用频率复用因子为1，这意味着小区间的干扰会特别强烈。尽管传统地通过精细的射频规划、天线的选择、下倾角和参数的设置已经减小了这一干扰，LTE也使用了更多的工具来减缓频域和时域上的干扰。这在3GPP发布的Release 8和10中已有介绍，本书也在第8章进行了相应的讨论。现今多小区协调或合作的信号处理则使人们对于多小区干扰路径有了完全不同的看法。这种新技术在3GPP的Release 11 LTE协议中被称作协同多点（CoMP）发送和接收，它能够利用小区间的干扰路径，而非把它们视作问题。因此，它能够使得单位面积上得到更高的容量，更为重要的是能够在多个蜂窝小区覆盖范围内提供更均匀稳定的服务质量。这一章中将会对CoMP的概念、网络架构的影响和性能增益进行介绍。

13.2　CoMP的概念

CoMP基于多小区之间协调或合作的信号处理。先从最精细的CoMP方案开始探讨，称为下行链路多小区联合发送（Joint Transmission，JT）。它将作为一个例证来展示CoMP是怎样改变人们对于移动通信中干扰的看法的。

在图13.1左侧，可以看到3个小区同时向3个终端利用相同的物理资源用传统方式发送信号。对于每个终端而言，这意味着从其服务小区传来的有用信号会受到其他两小区信号的干扰。在联合发送CoMP中，3个小区可以利用相同时域和频域资源向一个终端联合发送。这个听起来比较像WCDMA中的软切换，2个小区利用不同扰码向同一终端发送相同的信号。不管在CoMP还是软切换中，结果都是之前的小区间干扰信号可以叠加到终端接收的有用信号中。如图13.1中间所示，在

单用户模式中，当不同小区确定的物理资源发送到同一终端时，单用户使用3个小区的资源，系统可变为一个动态复用因子为1/3的系统。这有些类似于传统的小区间干扰协调，但又不同于ICIC仅仅通过禁止资源占用的方法，这种方案可以建设性地提高特定用户的信干噪比。但在一个高负载的宏小区，则无法有效利用复用因子降低的效应，这种损失有时会抵消CoMP的增益。为了减缓这个问题，如图13.1右侧所示，可将一组用户组合起来通过多用户CoMP模式传输，多个用户共享相同的物理资源。在此例中，每个用户在每个资源块的总发送功率与无CoMP情形保持不变，但同时小区间的干扰可以得到有效的克服。

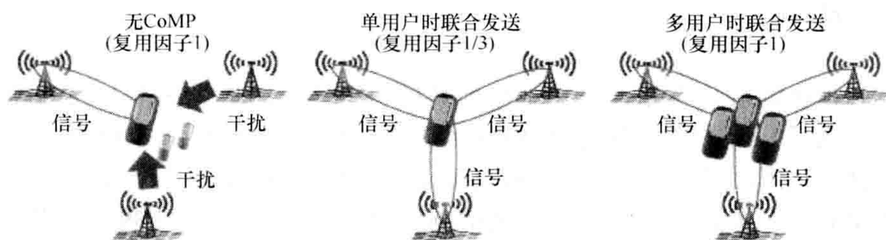


图13.1　下行链路多小区联合发送

这样的一个下行链路联合发送的好处可以利用香农公式来进行简单的说明。这里信道容量（C）是信干噪比（SINR）的对数。如图13.2所示，在上述JT CoMP的例子中，所有的干扰（在理想情况下）都转变为有用信号能量，出现在SINR式子的分子中而不是分母，从而带来更高的容量。

软切换和JT CoMP之间的共同点是基站发送冗余的相同数据给终端，目标是提高SINR。两种方案的目标都是通过多小区发送提高吞吐量和切换的鲁棒性。另外，JT CoMP可以利用从终端反馈的信道信息，来实现在接收端的信号相干叠加，从而带来所谓的波束赋形增益。这带来了额外的SINR增益，从而进一步提高了数据速率。

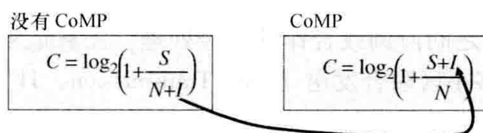


图13.2　CoMP可以将小区间干扰转换成特定用户的有用信号

作为联合处理方案的补充，下行链路CoMP也包含其他一些方案，如小区仅仅在空间域协作发送给不同用户；又如使用波束成形来减少小区间干扰。完整的下行链路CoMP方案将在13.4节中介绍，上行链路方案将在13.5中介绍。

下面将介绍CoMP与LTE中其他干扰协调技术的不同，如表13.1所示。Re-

lease 8 中通过在频域上减少对受到强干扰资源块的使用来避免小区间干扰。Release 8 中小区间干扰协调可以利用用户的报告或者使用 X2 接口和基站间通信来制定。Release 8 中小区间干扰协调不需要任何集中控制和基站的时间同步。而 Release 10 中增强的 ICIC 使用基站的时域同步来避免小区间干扰。如第 8 章所述，增强的 ICIC 为异构网络特别设计，使得宏小区和微小区能够进行共信道联合调度。CoMP 可以被看做处理小区间干扰的下一步方案。基站内 CoMP 可以仅使用一个 eNB，从而对传输网络没有要求；基站间的 CoMP 则对远端射频单元和集中式基带处理器之间传递数据符号的传输网络带来了很高的要求。

表 13.1　干扰协调可选技术

	ICIC	增强型 ICIC	CoMP
操作域	频域	时域	空域
基站时域同步	不需要	是	是
传输需要	低要求，由于只有控制平面参与	低要求，由于只有控制平面参与	联合处理传输接收为高要求，由于接收信号也参与
优化的时间跨度要求	相对缓慢（>10ms）	相对缓慢（>10ms）	快速（1ms），在联合发送接收时
3GPP Release	Release 8	Release 10	Release 11

13.3　无线网络架构选项

Release 8 中 LTE 无线网络被设计成分布式的，所有的无线网络功能都位于基站。在 Release 8，基站间通过慢信息交换的分布体系结构或基于终端反馈的分布式算法来进行频域小区间协作。更先进的实时小区间干扰协调，例如 CoMP 可以利用一个共同的集中控制单元，使得在一个较短时间内多小区的传输最优化。因此，CoMP 的特性也可以对无线网络体系结构和传输需求产生影响。图 13.3 说明了两个极端的体系选项：分布式基带和集中式基带。分布式基带是 LTE 网络中的常规解决方案。集中式基带在基站端使用简单地远端射频单元，它通过高速光纤与基带池（也叫做基带旅馆）相连。

快速地回顾一下无线网络体系结构的历史。在 WCDMA 中通常的想法是无线电信息的高级处理能力主要集中在无线网络控制器（Radio Network Controller，RNC）中，而基站只负责射频和物理层的编解码。由于用户数据速率较低，传输的要求也相当低。高速分组接入的性能要求推动了基站能够允许更快的调度和重传。LTE 的性能则前进得更远，它将所有无线相关的功能全部集中于基站之中，使得分层集中的体系结构向平坦分布式的体系结构逐渐演进。基带池的解决方案朝另一个方向发展，那就是远端射频单元是简单、死板的，所有的控制包括物理层都位于基带池。

基带池彻底地增加了传输的要求，因为它不但是将用户数据比特，而且也需要将物理层无线数据的采样信号从远端射频单元传输到基带池。传输必须支持超过 10Gbit/s 的数据速率以及总延迟要低于半个微秒，这意味着基带池要求专用的光纤或者高带宽的微波无线电和远端射频单元相连。这个包含基带池的传输解决方案被称为前传网络，用于区别传统的回传网络。传统方案中传输是在解码之后，而基带池方案中传输在解码之前。在图 13.4 中阐述了各种体系结构的示例。

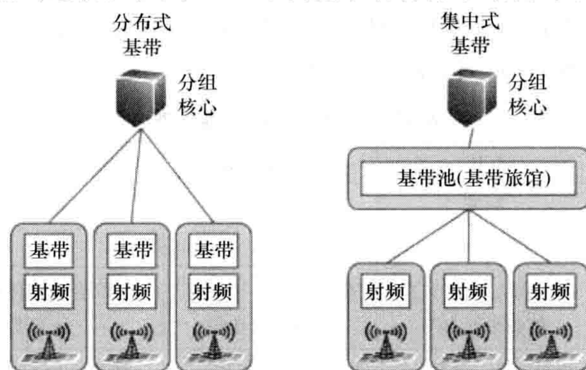


图 13.3　分布式和集中式基带

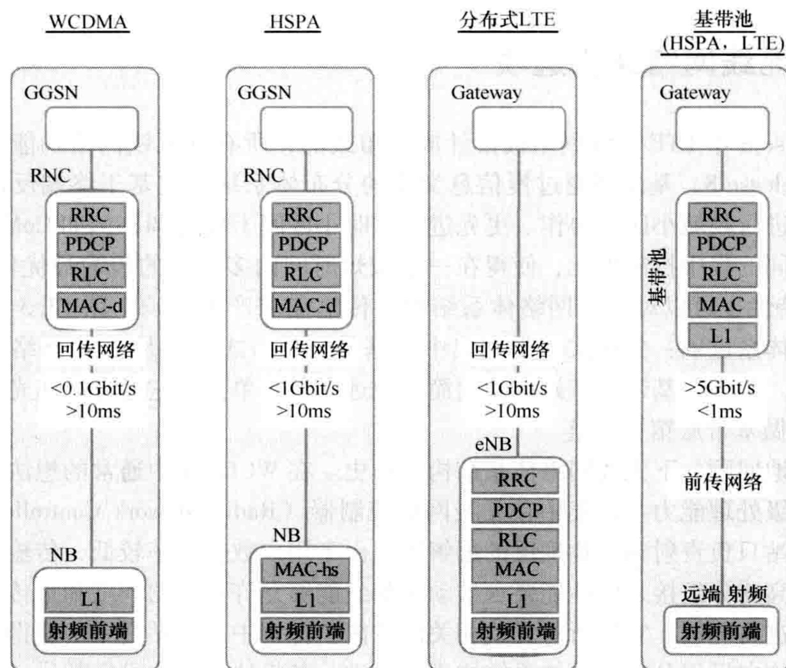


图 13.4　无线网络体系结构

对于 CoMP 的实现，同样也有更为简化的方案来减少传输的需求或者使传输要求更加兼容于传统传输标准方案的性能，例如以太网。一个选项是使 CoMP 操作仅在同一个基站的扇区间实现，而不是在不同基站之间。另一种可能是层 1 和对时延敏感的层 2 功能集成到远端射频单元中。这样可以使用类似 WCDMA IuB 接口功能，从而有效地降低了传输要求，但是却牺牲了 CoMP 的增益，特别是在上行链路。

下面分别考虑使用 CoMP 与否时的具体传输要求。分布式体系结构中传输需求可以通过峰值数据速率或者平均容量来制定。对于 20 MHz 2×2 MIMO 的 LTE，峰值数据速率为 150Mbit/s，典型的小区容量为 30～40Mbit/s。对于一个三扇区基站，传输要求在峰值情况是 450Mbit/s，平均情况大约是 100Mbit/s。当使用 CoMP 时，介于射频和基带间的前传接口将使用可用的标准方案，例如开放式基站架构或通用公共无线接口规格。其原理是传输无线信号的同相和正交分量（Imaginary Quadratic，IQ）样本，所以有效数据速率决定于系统配置，也就是核心的无线参数、系统带宽、天线数量，等等。这同样意味着传输要求随着站点的峰值数据速率演进而提高。各接口规范都定义了一组包含控制开销的核心速率。例如表 13.2 中阐述了不同的下行链路射频站点配置的 IQ 采样率要求。同样的要求存在于上行链路，但有时会有所不同，例如 WCDMA 中的情况。

表 13.2　基于射频站点配置的前传网络中下行链路 IQ 数据速率要求；实际配置速率决定于实际射频和基带模块的小区（扇区）分割

条　目	带　宽	天线数目	扇区数目	前传速率（原始的 IQ 数据采样）[①]
WCDMA	10MHz	2	3	1.5Gbit/s
LTE FDD	20MHz	2	3	5.5Gbit/s
LTE FDD	20MHz	4	6	22.1Gbit/s
LTE TDD	20MHz	8	3	22.1Gbit/s

[①] 对于 CPRI：考虑开销大约 7%，使用最近分界速率，如 Nx0.6144Gbit/s。

显然运营商必须考虑前传网络的成本问题，采用低成本的光纤技术例如例如粗波分复用，或者限制更短的前传距离。所需的前传数据速率随带宽和天线数的增加而增大。前传带宽要求典型地要比回传网络带宽要求高 50 倍。

尽管前传的代价很高，集中式体系结构仍然被考虑作为 CoMP 的最有效实现方案。集中基带池带来的其他好处还包括：

① 无线网络的软件或硬件升级将会更简单。这可以带来网络运维成本开销的降低。

② 使用基带池不需要 X2 或 S1 信号传输，使得切换更快。乒乓效应的降低影

响允许更精确的小区选择，从而有效地提高了小区边缘的数据速率。

③ 传输信号在基站聚合，使得发往核心网的移动性信号数量减少。

④ 多个射频站点的基带处理资源合并后，可使得基带单元的规格减小。

集中式基带池也被称为集中 RAN 架构或者“云化”RAN 架构，其原因是基带处理可以位于云网络之中，类似于通用处理的服务器功能。但是，了解云计算和集中/云 RAN 之间的区别很重要。云计算允许数十毫秒的延时，要求爆发的数据速率达数 Mbit/s，但是集中 RAN 的要求远高于此。同时在云计算中信息在集中位置的寿命相当长，甚至达数小时；但是在集中 RAN 中只有数毫秒。云计算有典型的数千甚至数百万客户端接收信息，而集中 RAN 只连接数十或数百远端射频单元。表 13.3 展示云计算和集中式 RAN 的区别。

表 13.3 云计算和集中式 RAN 应用的差异

	云 计 算	基集中式 RAN（基带池）
客户端（基站）数据速率	Mbit/s 量级，低活动性，爆发性	Gbit/s 量级，恒定数据流
延时和抖动	数十 ms	<0.5ms，抖动在纳秒量级
信息被处理/存储的寿命	长（内容数据）	极端（数据符号和接收数据采样）
允许的恢复时间	秒量级（有时数小时）	毫秒量级为避免网络断电
连接到集中地点的客户端数目	数千，甚至数百万	数十，或许数百

13.4 下行链路 CoMP 发送

现在讨论不同的下行链路 CoMP 传输方案，主要的差别在于多小区联合发送到单个或多个终端。不同的方案可以依据 CoMP 小区集合如何分簇来进行合并。CoMP 集合指的是用户可以接受或发送数据的小区，可以看做类似于 WCDMA 中的活动集。两者根本上的区别展示在图 13.5 中。集中控制器是指负责跨不同小区的数据传输的实体，它既可以主从式结构与通过分布式且快速的 X2 接口互联的基带处理单元相连来实现，也可以集中式的基带池架构来实现。

在协调调度和波束成型（CS/CB）方案中，终端仅从各自的服务小区接收数据，但邻近小区需要进行协调地调度和预编码，使得小区间干扰可以得到避免或者在一定程度上减缓。这可以被看作是 Release 8 中小区间干扰协调的扩展。通过这种方式，特定终端的 SINR 可以提高，但邻近小区的调度自由度会降低，降低程度取决于系统中的天线特性和现有的激活用户组。

在联合发送（JP）方案中，网络基础设施需要负责将特定终端的数据传送到多个小区，可以使得更个大范围的无线资源管理灵活性可以实现，允许非服务小区参与到对特定用户的信号发送中。更具体地说，这允许系统可以基于瞬时信道在单

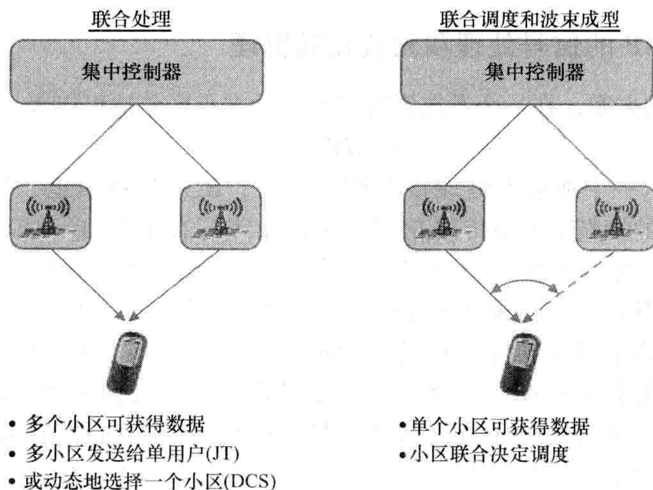


图 13.5　联合处理与协调调度和波束成型

个或多个小区之间快速的选择，以实现对特定终端在特定无线资源上以最优的方式进行信号发射。此点在这里进一步区分：

① 动态小区选择，同一时刻在每个物理资源仅有一个小区传输给一个终端。

② 联合处理（JT），多个小区在相同资源上共同联合地发送给一个或多个终端，以实现最大增益，这在本章开头讨论过。

接下来，介绍支持下行链路 CoMP 相关的不同实现方面。

13.4.1　下行链路 CoMP 在 3GPP 的实现

对于 CS/CB，每个相关小区仅仅需要粗略地了解其到用户以及其他相邻小区到用户的信道状态信息；而 JT 要求在所谓 CoMP 激活组中所有参与的基站知晓所有参与的小区和终端之间的复合信道信息。为此，参考信号的结构在 Release 10 中进一步进行了优化。用于信道状态信息测量的公共参考信号和用于解码的专用参考信号进行了区分。该优化使得 CoMP 可以更有效地反馈信息给网络，同时允许下行链路实现基于用户的波束成型。第 6 章描述了新参考信号设计的细节。

从 CoMP 的观点来看时分双工和频分双工的设计存在着一些区别。TDD 情况下，上行链路和下行链路信道是互易的，这意味着要求下行链路的 CSI 可以从上行链路 SRS 得到。在 FDD 系统中，上、下行链路传输被双工模式分开，快速衰落也因此不相关。在这种情况下，下行的 CSI 估计需要终端完成，然后反馈给网络端。TDD 相比于 FDD 有潜在的优势，因为 TDD 中不需要反馈信号，这可以避免反馈时延和量化限制。

13.4.2 CoMP 的信号处理和无线资源管理

对于所有的方案，在一个系统资源子集上的多小区传输可以表示为

$$r = \boldsymbol{HW}s + n \tag{13.1}$$

这里 r 表示一个或多个终端接收到的信号，H 是多路信道，$\boldsymbol{W}$ 是一个包含传输天线权重的矩阵，s 是传输信号，n 是噪声。在 CS/CB 和 DCS 的情况下，$\boldsymbol{W}$ 含有很多 0，原因是同一时刻仅有一个小区发送给同一个用户。在 JT CoMP 的情形中，所有元素都可能被用到，有两个流行的传输天线权重变异型设计：一个是基于多路信道的转置，这是一个迫零解决方案，（理想情况下）可以完全移除平行传输到多终端的干扰。另一个设计是用的所谓的维纳滤波来在最优化终端接收信号和最小化干扰之间找到最好的权衡。这两种不同设计的天线权重可以形式上表示为

$$\boldsymbol{W} = \beta \cdot H^{H}(HH^{H})^{-1} \text{or} \boldsymbol{W} = \beta \cdot \left(HH^{H} + \frac{tr\{\boldsymbol{R}_{\mathrm{nn}}\}}{P}I\right)^{-1} H^{H}, \tag{13.2}$$

这里，β 是总功率受限时的比例因子，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{nn}}$是有关终端所见从 CoMP 组之外传来的噪声或干扰的矩阵，P 是投入到联合发送到终端的总功率。

下行链路 CoMP 一个内在的挑战是邻近小区必须通过合作的方式调度终端到物理资源上，由此 CS/CB，DCS 和 JT 才能有效地实现。因此，邻近小区需要牺牲调度的灵活性来建立 CoMP 模式。这意味着一个特定用户的 CoMP 组包含多少小区存在一个折中，如果为一些用户付出过高的代价，则系统的多用户调度分集增益将因此而降低使得整体系统性能受到损失。一个好的 CoMP 实现可以动态地估计这些权衡，并且由此作出最优的选择。另外，CoMP 发送或接收包含多少小区还根本地受限于网络体系结构，例如整体上多少个小区可以被划分到 CoMP 可以挑选的激活小区集合中。这整体的一组小被称为一个 CoMP 簇。

但是，下行链路 CoMP 技术的关键复杂性在于 CoMP 组的选择应该在基于每个用户的基础上进行最佳地选择，这意味着大量的小区需要称为 CoMP 簇的一部分才能得到最优的增益。CoMP 增益取决于 CoMP 集合中多个小区之间的路损关系的平衡，即差异应少于 6～9dB 时才可获得较显著的单用户增益。在实践中发现超过三个小区的 CoMP 组的性能就开始受限。在一个 3GPP 宏网络仿真环境中，基于 6dB 的路损差异限制，并假设 57 个扇区均属于 CoMP 簇，则平均的 CoMP 用户数量约为 36%，且其中 11% 的 CoMP 用户选择的是同站内的三个扇区进行 CoMP 操作。从单用户和剩余用户角度看到的 CoMP 增益特性列在表 13.4 中。

表 13.4　下行链路 CoMP 增益机制

	下行链路 CoMP 用户	其 他 用 户
增益机制	通过使用多小区的功率增加发送给单个用户的功率	在低负载情形下，减少站点间干扰，CoMP 组中的用户可能得到更快的服务
	在现有天线分集上通过 MIMO 增加分布和集中调度方案	
	更少的小区间干扰，因为现在干扰成为有用信号或者被减少	
	分布式网络中采用切换门限来防止乒乓效应造成的 INR 损失可以得到减少	
限制	连续传输依赖于非常精确的多路信道估计和给传输端的反馈	在 CoMP 组中，对于服务用户本小区资源减少，在高负载时产生影响。这随 CoMP 组规模增大而增加
	考虑到减少调度灵活性，下行链路 CoMP 组中小区间信号不平衡应该在一定门限以下（上行链路不要求）	在一些异构网络设置中 eICIC 相比 JT CoMP 可能提供更大的网络增益
	先进的用户接收技术，例如 IRC，部分地利用了和 JT-CoMP 相同的增益机制	

13.4.3　其他实现方面

除用户在多个小区间如何分配数据之外，其他对网络不同的要求也使各种方案有实质上的区别，接下来将介绍这些方面。

13.4.3.1　传输/网络体系架构

不同的 CoMP 方案在进程结构上有不同的要求。JT 从集中基带处理中获益，如图 13.3 所示。两个校区应该传输完全相同的数据流量。这表明高传输容量，例如 CPRi，要求在基带池和远端射频单元间携带编码和调制数据数据采样。另一方面，CS/CB 能够在一个分布式的体系结构中工作，这意味着对传输容量要求的缓和。DCS 的要求在 JT 和 CS/CB 之间，因为一方面这些方案要求用户数据在所有参与节点都可获得，但是另一方面他们不要求小区间严格的同步传输。

同样，要求也会随着关注站点内或站点间 CoMP 的不同而有很大的不同。站点内 CoMP 指的是不同扇区间的 CoMP 操作在一个基站，站点内 CoMP 对于传输要求和同步化没有任何附加要求。站点间 CoMP 则有较高要求，但是当 CoMP 操作可以延伸到分离的基站间时，并且得到更多好处。后面的仿真研究表明站点内 CoMP 是一个具有吸引力的选项，因为它可以提供大多数性能增益并且保持网络要求较低。

13.4.3.2　基站同步

在CS/CB和DCS中，同一时刻只有一个基站传给单个用户，这些方案相较传统LTE系统不会在同步上产生其他要求。但是JT情形下，则要求一个精确得多的时域和频域同步，只有这样精确的连续重叠或者顺序信号才能被终端得到。为了从JT获利，JT的同步要求大约比CS/CB和DCS高出5倍。要注意的是，为了最好的性能变现，相位噪声也是一个需要被最小化的因素。

这三种下行链路CoMP方案的要求和特点总结在表13.5中。

表13.5　联合处理和协调调度/波束成型之间的区别

	协调调度和波束成型（CS/CB）	联合处理（JP）	
		动态小区选择（DCS）	联合传输（JT）
数据可用性	仅一个小区	CoMP组所有小区	CoMP组所有小区
数据发送	总是从服务小区	单一时刻从单个小区协调传输	多小区连续传输
发送	仅有控制要求	CoMP用户要求多两倍的用户面容量	对带宽和延时有实质的高要求，见表13.2
基站同步	0.05ppm频率准确度和3μs时间精度	0.05ppm频率准确度和3μs时间精度	精确的同步要求：0.02ppm频域精度和0.5ms时域精度
信道状态信息（CSI）	更低的要求	更低的要求	精确的CSI要求

13.5　上行链路CoMP接收

与下行链路截然相反，从3GPP规范看上行链路CoMP接收更简单。Release 8的用户已经可以实现上行链路CoMP，因为上行链路CoMP没有必要对无线接口标准规范做任何修改。但实际上行链路CoMP的实现必然要求网络侧做出改变。CoMP接收要求来自网络中若干天线的信号发送给一个中心基带接收机，在这里它们可以被用于针对每个用户的联合处理和检测过程。联合接收技术也可以和其他上行链路增强技术结合，例如IRC、自适应天线、多用户检测方案等。

由于上行链路CoMP接收通常来说对系统容量没有任何消极的影响，是一种很有吸引力的方案。但需要考虑的问题是，采样数据流通过传输网络传送至集中节点的成本很高，另外在集中式处理接收机中的计算复杂度也会很高。因此，可采用基站内的LTE CoMP，与WCDMA中的软切换相似对传输将没有任何要求。但是当使用基带池架构时，也可以考虑实现跨大量小区的上行链路CoMP接收，参见前一节内容。

上行链路 CoMP 技术存在多种不同的实现方案[2]，每个都代表在性能表现增益、传输数据速率、延时和计算复杂度方面不同的折中。一些可能的上行链路 CoMP 技术列在图 13.6 中。

在图 13.6 中，将上行链路 CoMP 技术分类为协同调度和接收处理两种主要方法。在动态接收节点的选择中，最合适的接收节点或小区甚至可以基于瞬间的信道状态信息进行选择。通过有效地得到更精确的小区选择，小区边缘数据速率得到提高。CoMP 还允许上行链路接收节点的选择独立于下行链路小区选择，这在异构网络中尤其有用。这时因为异构网络中微小区的下行链路能量被认为比宏小区更小；而另一方面，用户均采用相同的功率发射，这意味着微小区的下行链路覆盖面积可以比它的上行链路更小。换而言之，一个在宏小区和微小区之间边缘的用户可以从宏小区接收到更强的下行链路信号，但是通过微小区接收它的上行链路可得到较好的质量，这在图 13.7 中进行阐述。

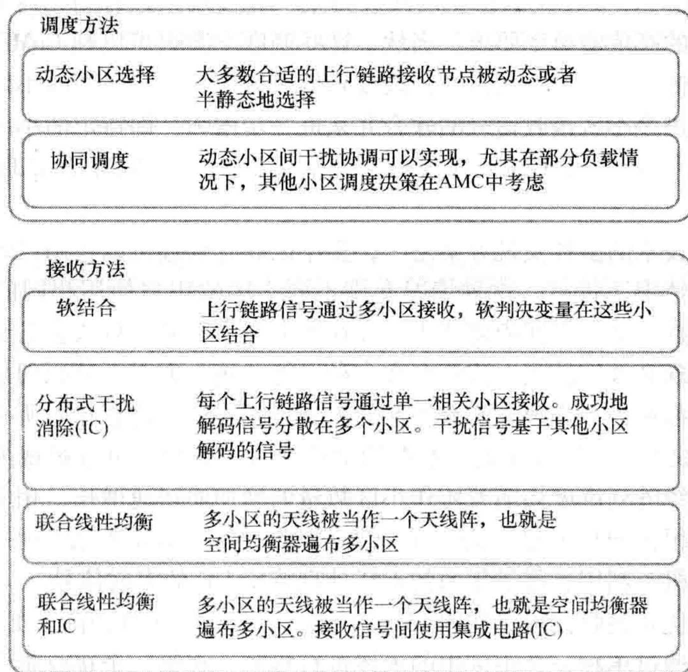


图 13.6　上行链路 CoMP 技术

多小区间的协同调度允许小区间干扰协调在每个独立的调度时刻执行。这使得 ICIC 的有效性可以得到更进一步的提升。小区边缘数据速率的提高可以通过在相邻小区的协调用户调度来实现——避免为小区边缘用户分配受到严重小区间干扰的上行链路资源块。另外，小区间干扰可以基于邻近小区的调度决策来部分地进行预

测，通过在自适应调制和编码中考虑干扰预测因素，则可提高链路自适应的准确性。

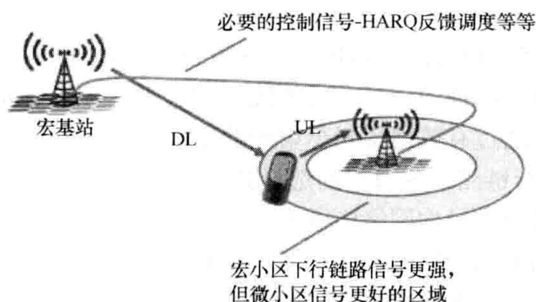


图 13.7　异构网络中的独立上行链路和下行链路小区选择

CoMP 调度方案可以和传统的单小区接收方案一起使用，这时则无需 CoMP 接收处理方案时所需的高传输速率要求。当然，这些调度方案也可以和 CoMP 多小区联合接收方案同时使用。例如，通过协同调度降低小区边缘用户强烈的小区间干扰的同时，还可以通过多小区接收信号的软合并来进一步增强，即特定的小区边缘用户发送的信号可以被多个扇区的天线接收，然后再经过小区间联合处理进行软合并。

作为联合接收技术的多种实现方案之一，多小区联合处理可以在用户调度仍归各小区独立调度的情形下进行。这种情况允许不同小区的用户使用相同的物理资源，同时可采用干扰消除或空间隔离技术。在这种方案中，调度算法会尝试选择合适的用户配对来实现高效地接收，这将存在多种可能的接收方案。其原理是将所有协作小区中的天线都视为一个独立的跨小区的大型天线阵列。这意味着所有可能的 MIMO 接收机，从线性多小区均衡器到复杂的干扰消除接收机，可以被视为可行方案，这样的联合天线阵列维度将随着协作小区数量的增加而快速增长，相应的接收机计算复杂度也将很快增长至超过实际可行性。因此，我们需要考虑实现一个次优的实际可行的接收机，利用有限子集内的天线处理特定 UE 的发射信号。

为示例这种次优化接收技术，在图 13.6 中给出了分布式干扰消除。如图所示，每个上行链路信号通过单独一个小区中的天线进行接收。在第一个接收阶段各个小区的信号分别进行解码。然后，软编码的输出或信号成功解码的硬比特被分布在各小区中。在编码失败的小区中，将进入采用小区间干扰消除的第二接收阶段。这时将基于其他协作小区的已解码信息重新生成干扰信号，然后消除服务小区接收信号中的干扰分量，来增强所需信号的检测。重新生成干扰信号需要对干扰信号经历的信道基于参考信号进行估计，然后在小区间交互相应的信息。

在集中式基带池的情况中，CoMP 上行链路小区数目可能相当大。所有潜在

CoMP 小区联合接收的系统计算复杂度很容易变得不可实现，即使是次优接收也是如此。因此，可以将所有 CoMP 小区基于地理位置分成多组小一些的 CoMP 小区簇。这样使得在 CoMP 簇中可以实现更加有效但计算复杂度也较高的联合接收方案，而在 CoMP 簇间可以使用计算简单些的上行链路 CoMP 技术，例如协同调度。本质上，这意味着在一个单独集中式基带池中的多小区间协作可以基于不同层次进行分层处理。因此这被称为分层 CoMP 技术。

所有 CoMP 接收技术都是基于从单个或多个邻小区接收到的额外信号信息。这意味着这些相邻小区需要对相应的信道进行估计。这是一个有挑战性的工作，因为所需信号在邻近小区接收到的能量一般比邻近小区本身信号能量小。可以看到上行链路 CoMP 接收受到信道估计的影响要比普通的单小区接收更强[3]。基本上 CoMP 接收有可能使用默认解调参考信号配置，此时序列组在各个小区是独立分配的，且参考信号在小区之间进行了随机化。但是，小区间非正交的 DMRS 将显著地限制 CoMP 接收的增益。CoMP 接收增益可以通过在多个小区间重用相同的序列组来实现小区间正交的 DMRS。这将允许进行更好的多小区信道估计，但是同时降低了调度的自由度，由于小区间正交 DM RS 将使得一些物理资源块的分配受到限制。

另外，标准化工作依然在提高上行链路 CoMP 接收上进一步增强。Release 11 包含提高 CoMP 在 PUSCH 和 PUCCH 上性能的方案。两个信道都引入了更加灵活的基于特定 UE 的参考信号配置。例如小区间正交 DM RS 可以提高 CoMP 性能，并且 Release 8 已经支持。但是，它涉及对调度的限制，因为正交 DM RS 需要占用正交的资源块。这样的调度限制可以通过引入基于 UE 的 DM RS 序列配置和相应的跳频模式来进一步减轻。Release 11 还考虑了其他方案，包含功率控制增强。

13.6 下行链路 CoMP 增益

下行链路 CoMP 性能增益主要有三个重要途径：

① 小区间空间域协作来抑制干扰和/或提高所需信号强度。这个方法对信道状态信息的精确度很敏感，因此对基础设施有较高的要求。

② 协调无线资源管理来使资源分配最优化。

③ 减缓小区边缘的小区选择造成的性能损失，存在于分布式的采用非实时小区选择机制的基站部署场景下（由于切换门限余量和触发设置）。

第二种方式并不包含精确的空间域信息；因此它可以提供轻微的但稳定的增益，可以工作于普通的基础设施中。CS/CB 和 DCS 主要发挥第二个好处，而联合传输发挥第一个好处。第三个好处在小区边缘有重大意义（例如某些现网实现中可能应用的有效切换余量是 3 ~ 4dB）但是，随着时间推移分布式解决方案也可以得到优化，从而压缩至更合理的切换余量。CoMP 增益的机制在表 13.6 中进行了

总结。

表13.6 不同CoMP选择的下行链路CoMP增益

	协调调度和波束成型	动态小区选择	联合传输
小区内空域协作	—	—	是
协同天线资源管理	是	是	是
切换余量的减少	是	是	是

图13.8总结了CoMP相比Release 82×2 SU-MIMO的增益。多种不同的下行链路CoMP方案在一个典型的均匀宏小区网络拓扑中进行模拟，站间距为500m，采用满队里业务模型。图中，站内CoMP是指协作集限制到三个共站的扇区间，而站间是指CoMP接收信号来自不同的站点，每个基站都有三个扇区。最右边的两个情况下表示CSI未经量化从而在基站端可提供的最大潜力的CoMP；其他情况下则假设基站侧获得量化的CSI（码本）信息以模拟现实环境。DCS和Release 8 SU-MIMO的开销假设均为2个小区参考信号（CRS）端口；对于JT，CS / CB和Release 10的MU-MIMO则假设2个CRS端口和1/2个DMRS端口。

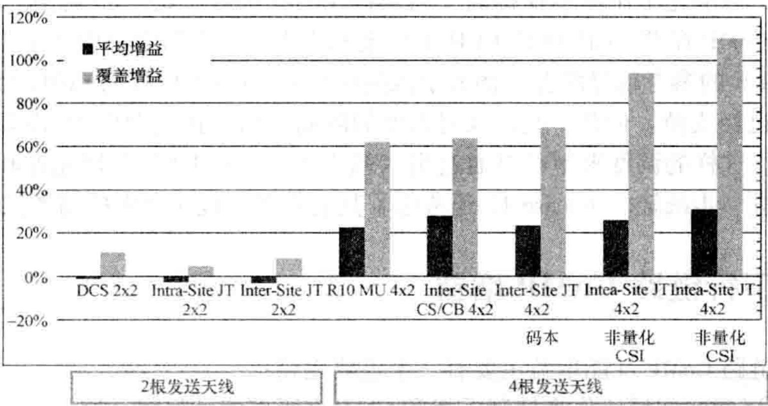


图13.8 下行链路CoMP与Release 8 MIMO2×2增益比较

结果表明，DCS是最好的下行链路CoMP方案，在两个发射天线的假设下。通过DCS进行快速移动性管理和资源协调，从而以一种更优的方式来利用无线资源。CoMP增益对于小区边缘用户仍仅10%左右，且对平均用户吞吐没有增益。JT并不能提供太多的信号处理增益，因为仅有两跟天线大大限制了处理维度。额外的约占10%的DMRS开销也使得JT的优势降低。

使用四个发射天线即使在没有使用CoMP的情况下也可提高下行链路的性能（特别是覆盖）。四个发射天线使得天线维度有了更多的自由度，这样使得JT的性能增益可以抵消带来的额外开销，从而带来主要针对小区边缘用户的系统性能增

益。小区边缘覆盖增益相比 Release 10 4×2 MU-MIMO 可以达到高达 40% 以上增益。对于 2×2 的情况下，CoMP 对平均小区容量的影响很有限。然而，当仅考虑基站端获取量化 CSI 时，JT 增益仅接近于 10%。

在非理想信道信息之外，基站间频率同步的不理想也是硬件实现角度无法避免的问题。每个基站的频率振荡器受到一定程度的相位噪声影响而导致随机地波动。RAN4 要求 eNB 频率同步在 0.05ppm 内，在宏覆盖区域，这意味两个 2GHz 载波的 eNB 频率偏差最大在 200Hz 以内。更直观地，200Hz 的频率偏移类似于 UE 在时速 50 公里移动时的多普勒频偏，这对于任何闭环操作都具有很大的挑战。

现在让我们假设两个小区到另一个终端之间的联合协作发送，其中所涉及的两个基站有 ΔfHz 的频率偏移。这个偏移的影响可以建模为基站信号乘以因子 $e^{-j\Delta ft}$。在这里 t 是下行链路信道估计和信道信息在发射端可用于联合多小区预编码之间的时间。因此，来自某个 eNB 的原始信号根据延时将经历一定的相移，这将削弱接收端信号的相关叠加效应。这样的相移在终端侧很难进行补偿，它需要知道频率波动的准确数值以及 eNB 反馈的确切时刻，这两者在 UE 端获取都很不容易。

图 13.9 给出不同的频率偏移下的 JT 的性能差异。在这里，四流 LTE 码本用来量化两个两根天线小区信号的 CSI。这取决于采用单流或双流传输，以及采用的是宽频带还是窄带的 CSI 反馈，由于频率偏移带来的性能退化约在 5% ~40%。为了保持性能损失较低，频率偏移量应低于 20 ~ 40Hz，这意味着相比非 CoMP 操作高出 5 ~ 10 倍的频率同步性要求。我们也注意到双流和宽带 PMI 是对频率偏移不敏感的，但这两者包含的空间信息都并不准确。双流码本相比单流码本要粗糙得多，参见文献［4］第 5.3.3 节。

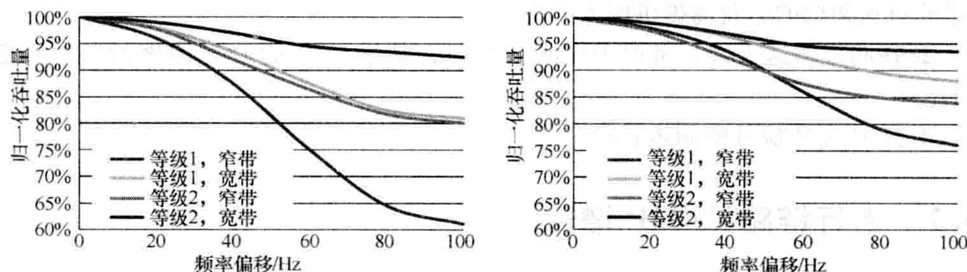


图 13.9 频率偏移下 JT 性能变现。左图 3dB SNR（2eNB 的信号能量），右图 13dB SNR

除了频率域缺陷，时域同步误差也是一个不容忽视的因素。参考 RAN4 定义，TDD 系统的 eNB 间定时偏差是 3ms，FDD 系统不需要任何的站间时间同步。在联合传输的情况下，定时误差和来自多个传输点的信号时延差的叠加将差生额外的频

率选择性，额外的频率选择性。通常在站间距小于 1km 的微小区场景，定时偏移将是主导因素。子带 CQI/PMI 的提出成为用于对抗这种影响的机制。频率选择性的影响可以通过定义小于相干带宽的反馈颗粒度来进行补偿。然而，实际系统只能承受一定程度更精细的反馈颗粒度，因为这意味着更大的开销。图 13.10 中描述了 JT 性能损失与定时偏差的关系（10MHz 的带宽，47 个数据采样对应于 3ms）。按照预期，窄带反馈是相对于宽带反馈更加鲁棒。证明窄带反馈可以在一定程度上抵抗频率选择性。然而，可以看到当时间偏移超过 5 ~ 10 采样点时，窄带反馈同样表现出性能上的严重恶化。

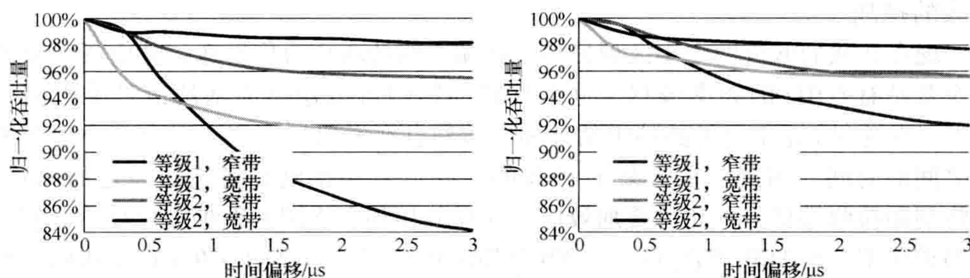


图 13.10　定时误差引起的下行链路吞吐量下降。左图考虑 3dB SNR（来自两个 eNB 的信号能量），右图假设 13dB SNR。注意这里 47 个采样时间偏移相当于 3ms

从这个仿真中可以得出这样的结论：基站间的定时同步应保持在 0.3 ~ 0.5ms，这将明显高于正常 TDD 的要求。

另外，下行链路 CoMP 技术并不能满足容量迅猛增长的需求。

① 在考虑真实 CSI 信息时，CoMP 增益最高仅 10% ~ 20%。站内 CoMP 增益贡献了绝大部分潜能。未来宏观基站的解决方案，例如六扇区和载波聚合，将持续为采用分布式架构的运营商提供巨大的潜能

② 在两根发送天线，考虑 DMRS 开销时，基于 CRS 的 DCS 方案性能可以超越 JT

③ JT 还需要额外的同步要求

13.7　上行链路 CoMP 增益

上行链路 CoMP 接收技术能以两种方式基本上改善上行链路性能。首先，所需的信号质量可以通过简单地合并更多的信号能量和增加可用的接收天线分集来进行改善。其次，多小区协同接收可显著增强小区间干扰消除或抑制。从图 13.6 中列出的 CoMP 接收方法可以看到，软合并提高了所需的信号质量，但并不能提高干扰抑制能力，因为已经采用分布式的 IC 接收机用于小区间干扰抑制能力的提升。而

CoMP 联合多小区均衡则可同时增强所需的信号质量以及干扰抑制能力。

所获得的增益集中在小区边缘用户的数据速率，主要是小区边缘用户在多个小区的接收信号功率是可比的。增益还取决于小区选择的准确性。在精确的小区选择下，邻小区的接收信号功率往往低于服务小区功率，使得增益水平保持在轻微水平。当然，在次优的小区选择下，增益将随之增加。一种特殊的情况是异构网络，小区选择是一个下行链路信号质量和小区分裂增益以及上行链路信号质量之间的复杂折中。当微小区基站发射功率大大低于宏小区时，微小区的下行链路覆盖将明显低于其上行链路的覆盖。当 UE 基于下行链路信号强度选择小区时，小区边缘用户的上行链路信号质量将得到显著提高，尽管其下行链路仍然是服务于宏小区。这就造成了在每宏小区 4 个微微，微微小区选择相比宏小区具有 6dB 偏置的场景下，可以达到高达 40% 的小区边缘数据速率增益。这里 CoMP 接收增益严重地依赖于参数选择；如果微小区选择进行相反的偏置，则增益反而会减少，反之亦然。

上行链路 CoMP 在小区间干扰抑制能力上的增强在干扰受限的环境下将变得更加重要。对于 LTE 频率复用因子为 1 的系统正是这样的情况。这里还涉及干扰缓解和功率控制之间存在重要的互动关系。如果上行链路 CoMP 接收的目标是提高小区边缘的数据速率，功率控制不会受到显著的影响。增强的干扰抑制能力主要用来清除小区边缘 UE 接收的干扰信号，而功率控制主要是用来保持自身信号发射功率和来自其他小区（或对其他小区）的干扰之间的合理平衡。CoMP 带来的增益主要针对小区边缘用户，但同样小区容量也可以得到增加。然而，当主要目标是提高小区容量时，则情况是不同的。通常会采用进一步提高发射功率，而小区容量则是在更强的接收信号功率和干扰抑制能力下才能得到提高。在单个小区接收时，由于增加的干扰电平，将会导致小区边缘性能的严重退化。当使用 CoMP 接收时，增强干扰抑制能力可用来维持小区边缘的数据速率在可接受的范围，尽管来自小区内外的 CoMP 接收区域的干扰显著增加。

上行链路 CoMP 接收的仿真假设在同构宏网络布局，500m 站间距和满队列业务模型下进行。观察到的小区边缘数据速率 CoMP 增益如图 13.11 所示。站内 CoMP 接收是指 CoMP 接收仅在单基站三个扇区内进行，而站间 CoMP 是指超过三个基站进行 CoMP 接收，每基站三扇区。在有无 CoMP 的功率控制算法中使用部分路损补偿（α 设置为 0.8）。一种多小区联合均衡具备 IC 能力的均衡器被用来作为 CoMP 的接收机，并与一个二天线单小区具备 IRC 功能但不考虑 DMRS 开销的接收机进行了比较。结果表明，小区边缘的数据速率可以通过站内 CoMP 大大提升。还可看到，小区边缘性能在接收天线数量从每小区增加到四根天线得到进一步提高。CoMP 接收带来的相对单小区 IRC 接收的增益在两根天线和四根天线下是类似的。

对于图 13.6 中列出的接收方法，软合并带来的增益相比其他 CoMP 方案是最

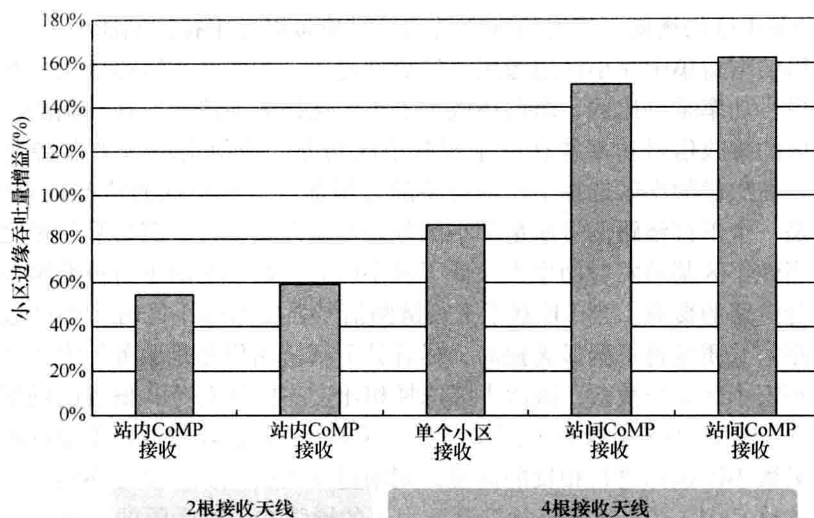


图 13.11　上行链路 CoMP IRC-SIC 接收和 2 根天线单个小区接收的小区边缘速率增益对比

轻微的，因为其仅仅实现所需信号的合并而无法提升小区间干扰抑制能力。另外，分布式干扰消除和多小区联合线性均衡可提供更合理的 CoMP 增益。这两种接收方法都可以提供相当可观的可比增益，大部分增益来自于多小区联合 IC 均衡。

在图 13.11 假设小区间采用正交的 DM RS。小区间正交 DM RS 对两天线的 IRC 接收的站内 CoMP 带来的影响如图 13.12 所示。与图 13.12 比较，接收机略有不同，因为这里没有包含 IC 阶段，这会降低约 10% 的性能增益。对于非正交

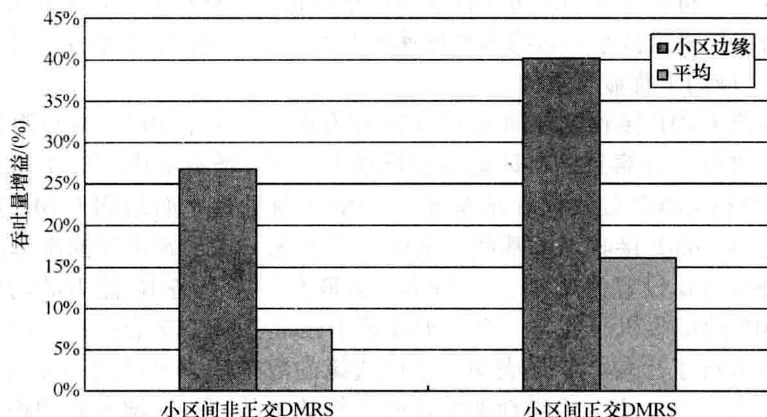


图 13.12　2 根天线站内 CoMP IRC 相比两根天线单个小区接收增益，采用小区间正交或非正交 DM RS

DMRS 配置，采用合适的小区间随机化的小区特定序列组。在小区间正交 DM RS 配置下，CoMP 协调区域内采用一个单一的序列组，采用循环移位和正交掩码用来创建正交的参考信号。为支持正交的参考信号，在两种情况下 PRB 分配都需要在小区之间进行对齐排列。可以看到，小区间正交 DM RS 可以通过提高信道估计精度来显著提升 CoMP 多小区接收增益。

13.8　CoMP 实地测试

下行链路和上行链路 CoMP 的各种概念已经在实地测试中验证成功。在由德国教育与研究部（BMBF 资助）和欧洲联盟部分支持的研究项目 EASY-C 和 Artist4G 中，一个大型的 LTE-Advanced 蜂窝测试系统已经在德国德累斯顿市中心落地。

下行链路 CoMP 测试方案之一是通过最多三个小区（每小区两根天线）向三个终端进行联合发送。可以看到，当终端相对静止且位于靠近三小区之间的边缘时，联合传输可以强烈地减轻小区间干扰，从而提高所有三个终端的数据速率。这个试验的成功也证明，多个基站之间可以获得充分的频域同步，并且原则上可以将所有所需的信道信息从终端反馈到基础设施。事实上，在这现场实测的下行链路 CoMP 增益是大于本文所给出的评估结果的，这也许是因为在下行链路试验中，只有真正参与联合发送的基站在工作，没有来自其他基站的背景干扰，而这些干扰是在系统级仿真中假设存在的。

为了实际评估上行链路 CoMP 协作的概念，将两个终端布放在一个包含 16 个基站的区域内，多小区联合检测方案与分布式干扰消除和基于非合作的 IRC 基准方案进行比较。所得到的结果与先前讨论的仿真结果非常吻合。上行链路和下行链路的试验测试结果记录在参考文献［5］中。

测试结果虽然不能取代系统级仿真，因为通过测试无法评估满载情况下的商业系统行为，但它足以证明新技术是可以正常工作的。CoMP 情况下的测试是成功的，这也直接导致 CoMP 技术最终能够被纳入 3GPP LTE Release 11 中。

13.9　小结

实际的 LTE 数据率受限于小区间干扰而不是热噪声。目前系统遇到的难题是小区边缘的数据速率往往只是理论峰值数据速度的一小部分。CoMP 是通过管理小区间干扰来提高小区边缘数据速率的方法之一，可以提供不论是在小区中心还是小区边缘都更均匀的服务质量。

在下行链路中，从多个小区到一个或多个终端的联合传输具有提供最高增益的潜力，但需要非常低的回程延迟，而协调调度/波束成形方案则要求较低。同一站

点内部多个扇区进行下行链路 CoMP 成为最直接的选择，因其无需任何进一步的回程要求并可达到大部分的传统 CoMP 收益。基站采用下行四根天线发送，考虑信道状态估计误差的情况下，小区边缘 CoMP 增益仅为 10%～20%。下行链路两根天线的 CoMP 增益明显低于四根天线。另外，下行链路 CoMP 并不能成为满足容量增长的关键技术，因此其带来的系统平均增益是有限的。仿真结果还表明站点内部的 CoMP 构成了 CoMP 增益的绝大部分。因此，站点内 CoMP 是可以享受 CoMP 增益而不对网络架构有重大变化的一个有吸引力的选择。另外，未来网络进一步的扇区化和额外的远端射频单元都是使单个站点的配置更强大，同时使得站点内 CoMP 更加有利。

在上行链路中，存在多种 CoMP 实现方案，从基于分布式干扰消除的协调调度到多小区联合检测等。后者可提供更显著的接收增益，付出的代价是巨大的回传容量需求。仿真结果表明，上行链路的联合检测可以提高小区边缘的数据速率 40%～50%。这个增益在异构网络中当上行链路信号同时通过微小区和宏小区进行接收合并之后将更高。仿真结果表明，站内 CoMP 可以提供大部分的 CoMP 增益，且在传统的分布式网络部署场景下也可取得显著增益。

上行链路 CoMP 可以在 Release 8 终端上使用，但下行链路需要新的终端。下行链路 CoMP 和更进一步的上行链路 CoMP 增强功能包含在 Release 11 规范中，还有一些增强功能在 Release 12 中继续实现。

参考文献

1. Tse, D. and Viswanath, P. (2011) *Fundamentals of Wireless Communications*, Cambridge University Press.
2. Marsch, P. and Fettweis, G.P. (2011) Uplink CoMP under a Constrained Backhaul and Imperfect Channel Knowledge, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **10** (6), 1730–1742.
3. 3GPP R1-112393 (2011) Channel estimation modeling for uplink in system level simulation. Nokia Siemens Networks, Nokia, 3GPP RAN1#66 meeting, August 22–26, 2011, Athens, Greece.
4. 3GPP TS 36.211 (September 2011) Physical Channels and Modulation, V.10.3.0.
5. Marsch, P. and Fettweis, G.P. (eds) (2011) *Coordinated Multipoint in Mobile Communications*, Cambridge University Press.

第 14 章　HSPA 演进

Harri Holma and Karri Ranta- aho

14.1　简介

高速数据接入（HSPA）为数据的无线传输提供了可能。在 HSPA 网络之前，无线网络主要提供语音业务。而目前在许多地区，HSPA 数据业务量达到了语音业务的 10 倍。数据使用量的上升及智能手机应用的发展对于 HSPA 无线网络提出了更高的要求。目前大量的 HSPA 智能终端促进了 HSPA 的演进。本章主要对于 HSPA 演进的关键技术及性能优势进行分析。关键技术主要可以划分为下面几个方面：多载波、MIMO 和多小区增强、数据传输、语音业务增强、高级接收机、平台网络架构及与 LTE 间的互操作。WCDMA 及 HSPA 演进的相关详细内容可见参考文献［1］。

14.2　多载波演进

为提升网络数据传输速率，最直接的方案就是提高系统带宽。在 Release 8 下行链路双载波 HSDPA（DC- HSDPA）中在下行链路方向上使用两个相邻的载波来将传输速率提升一倍。DC- HDSPA 已经在 2011 年得到了广泛的部署。在 Release 10 中采用四载波来支持 20MHz 带宽，在 Release 11 中采用八载波来支持 30MHz 带宽。在 Release 9 协议中增加了对于上行链路双载波的支持。在图 14.1 中给出了多载波演进的说明。

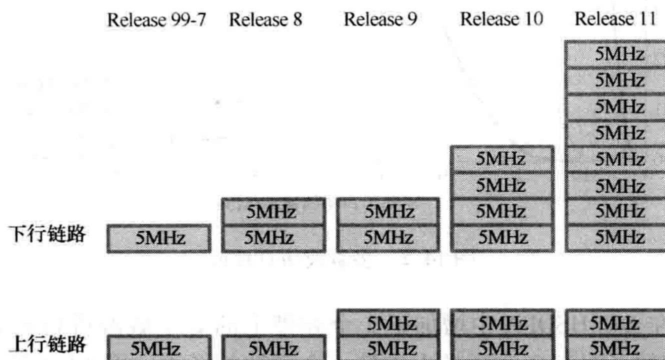


图 14.1　多载波演进

为了提升系统容量，运营商一般在 WCDMA 部署的初期就采用了多载波的方式。基于现有多载波的传输方式，将多个载波为同一个用户提供服务是提升系统峰值数据速率的有效手段。采用多载波技术可以提升系统频谱效率。通过在多个载波之间动态分配系统流量，保证系统多个载波之间流量的均衡，不会出现一个载波流量过载而另一个载波流量过低的情况。多载波系统也可采用频选调度，即使在系统流量较高的情况下也可为系统提供更多的增益。需要注意的是，即使在系统中仅有部分终端支持多载波技术的条件下，通过动态负载均衡、频域调度仍然可以提升系统的频谱效率。

图 14.2 给出了系统单载波、四载波和八载波条件下单用户的传输速率分布。用户随机到达 1MB 文件大小的业务，包的平均达到时间为 5s。当业务包到达时有较高的概率使用系统所有的载波。单载波用户仅能在单个载波的接收数据而无法使用其他的载波资源。多载波用户可以在多个载波上进行数据传输而提升其传输速率。单载波的平均传输速率为 7Mbit/s，四个载波时的传输传输速率为 24Mbit/s，八载波时为 40Mbit/s。总之，四载波时系统可以提供相对于单载波 3.4 倍的传输速率。八载波时获得 5.7 倍传输速率。

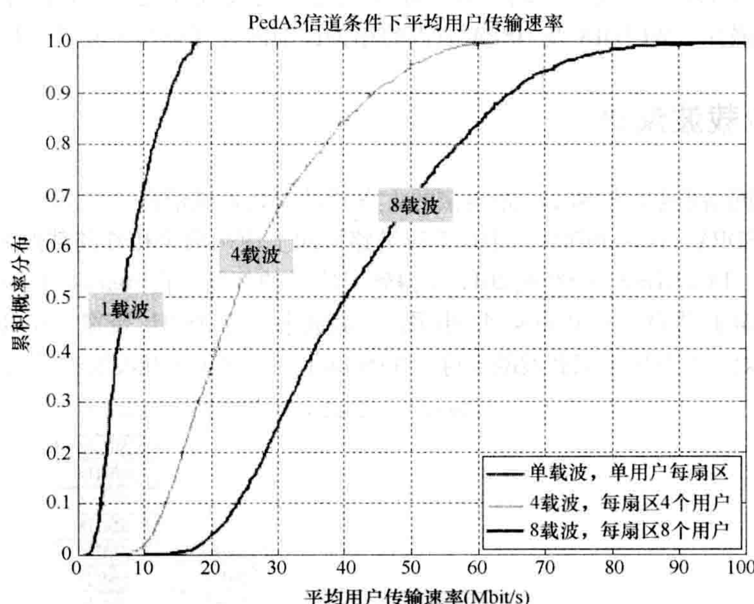


图 14.2 多载波仿真性能

Release 9 在 DC-HSDPA 中增加了 2 个频带上的 2 个载波进行聚合的能力。在 Release 10 中增加了对于 2 个频带上支持 4 个载波的能力。图 14.3 给出了在多载波终端上支持不同频带上的载波聚合的示意图。支持多频带上载波聚合能力的终端需

要在 RF 上增加对于多个频带上 HSDPA 接收的能力。因此，利用相同的 RF 硬件来实现在多个频带上的接收以提升系统频谱效率获得了广泛的关注。

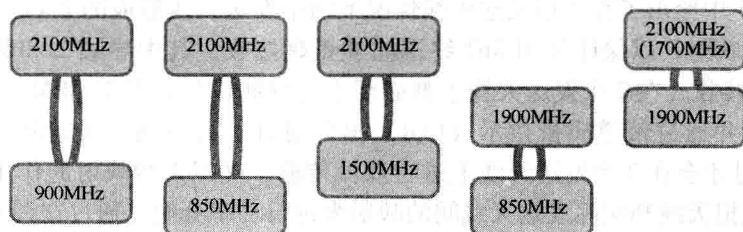


图 14.3　多频带合并

Release 11 讨论支持不连续的 4 个载波下行链路接收的能力。项目讨论的频带在频带 1（2100MHz）和频带Ⅳ（2100/1700MHz）。为实现这种方式，最易实现的方式就是需要在相同的频带实现 2 个独立的可调整的接收链路。当 UE 需要在 2 个天线连续的载波上进行数据接收时，一个可行的实现方式就是利用 2 个接收机来进行接受分集。当 UE 在不连续的载波上进行数据接收时，可以配置在一个接收机上进行一个频率集合的接收，用另一个接收机来接收另一个频率集合的数据。

14.3　MIMO 演进

2007 年，3GPP 在 Release 7 中引进了 2×2MIMO 操作和 16QAM 调制。Release 8 增加了 MIMO 和 64QAM 调制的能力。在 Release 9 和 10 中分别增加了对 MIMO + 64QAM 同时在 2 个和 4 个载波上进行操作的能力。在 3GPP Release11 中对 HSDPA MIMO 增加了 4×4 操作的能力。图 14.4 对于 3GPP 对 MIMO 的支持进行了说明。

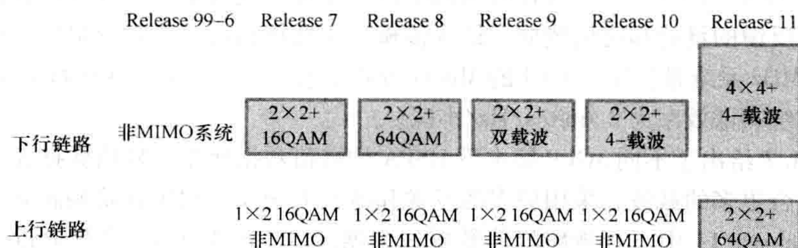


图 14.4　MIMO 演进

在基站和终端上部署 2 个（或者 4 个）发射和接收天线造成了对 MIMO 实际

部署的阻碍。另外，为支持 MIMO 时在第 2 个天线上增肌的额外的导频开销造成了非 MIMO 终端的性能的下降。

图 14.5 中给出了在单根发送天线情况下两个发送天线形成的 2×2 MIMO 进行的虚拟天线映射，以保证非 MIMO 终端能够正确接收，其中导频 2 和数据 2 仅由 MIMO 终端接收。在 2 个发送天线上都必须发送导频信号以帮助 MIMO UE 进行信道质量估计并通过信道质量指示（CQI）报告通过上行链路上报基站。仅当调度 MIMO UE 时才会在 2 个发送天线上进行双流传输。虚拟天线映射的作用是将发射功率通过虚拟天线和实际发送天线间的映射来进行功率分配，通过这种方式可以保证对于非 MIMO 终端也可以采用满功率发送。

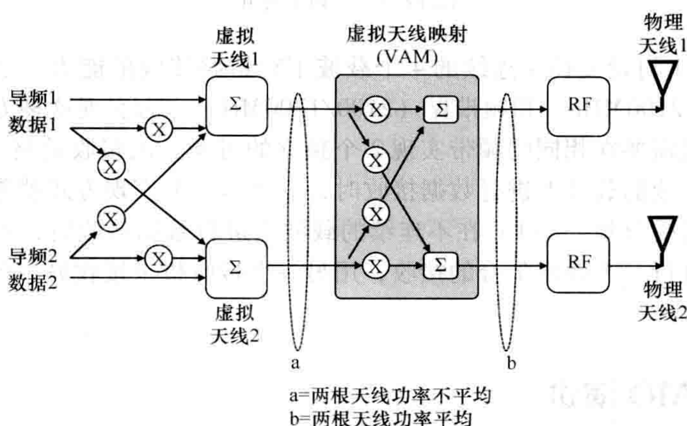


图 14.5　虚拟天线映射及基站侧 2×2MIMO 配置

图 14.6 给出了不同的天线配置条件下小区的平均吞吐量性能。从结果可以看到，增加更多的接收天线得到的性能提升要优于增加更多的发送天线。将接收天线增加一倍可以将系统容量平均提升 50% ~60%。将发送天线增加一倍仅能将系统容量提升 15% ~25%。通过 UE 的信道反馈，发送天线选择采用双流或者发射分集的方式。反馈的量化和时延造成了最优传输方式选择相对于接收分集方式更大的挑战。在 5MHz 系统带宽下，4×4 的 MIMO 方式下系统的最大小区吞吐量为 13Mbit/s，对应的系统频谱效率为 2.6bit/s/Hz/小区。

图 14.7 给出了不同 3GPP 版本下 HSPA 的峰值数据速率。峰值数据速率的提升主要靠聚合更多的载波，采用更多的发送和接收天线及采用更高阶调制方式。

在 Release 11 中下行链路峰值数据速率增加到 336Mbit/s。这是通过采用 8 载波和 2×2MIMO 方式，或者采用 4 载波和 4×4MIMO 方式。将八载波和 4×4MIMO 结合可以提供 672Mbit/s 的峰值数据速率，但是这个方式未在 Release 11 中定义。

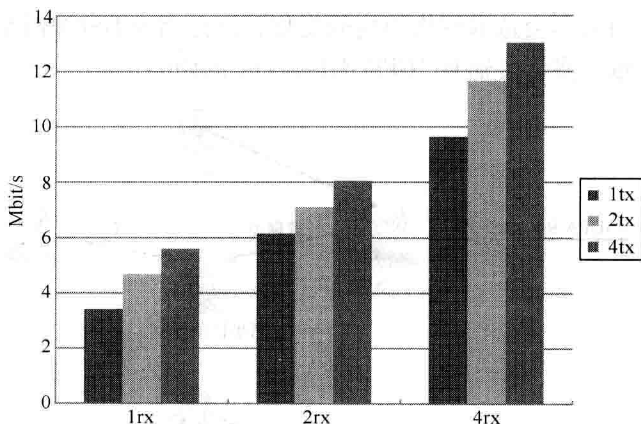


图 14.6 不同的发送和接收天线条件下小区平均吞吐量

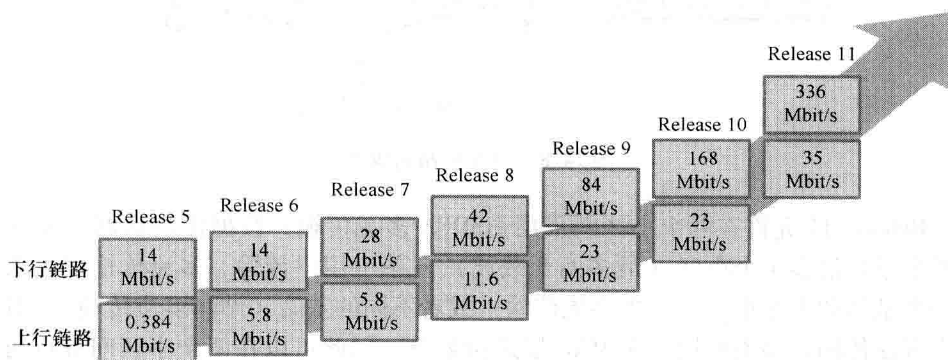


图 14.7 峰值数据速率演进

3GPP Release 11 在 HSPA 上行链路引入了 MIMO 传输方式，包括用于提升上行链路覆盖范围上行链路波速赋形（或者成为单流 MIMO 方式）及 2×2MIMO。2×2MIMO 和 64QAM 调制结合可以将上行链路单载波传输速率提升至 34.5Mbit/s。

14.4 多流传输

WCDMA Release 99 中采用软切换来提升小区边缘用户的链路质量，以最小化小区间干扰。在 HSUPA 中也使用软切换来控制上行链路切换。单小区的传输方式可以使调度和快速重传控制较为简单，但是这会造成小区边缘用户经受较高的小区间干扰而性能下降。一种提升小区边缘传输速率的方法就是采用两个小区给一个用户发送数据。这种方式就称为多流 HSDPA 传输。多流传输的概念在图 14.8 中给

出。多流传输的引入不会造成网络架构的变化，这是因为 HSPA 网络已经采用 RNC 来控制多流的传输。多流传输是 3GPP Release 11 的内容。

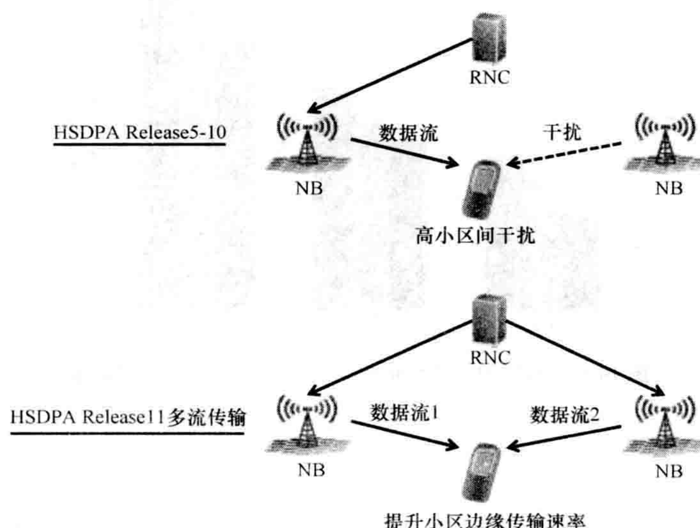


图 14.8　多流传输的概念

Release 11 允许在两个小区间采用 HSDPA 多流传输：数据流将从两个扇区或者两个基站最多 4 个小区（最多两个载波）向单个用户传输。多流传输可以来自同一个基站的多个小区（站内多流传输）或者不同的基站（站间多流传输）。对于站内多流传输，多流数据是在 MAC 层进行划分，因此可以在两个小区间进行与双载波 HSDPA 相同的联合调度。对于站间多流传输，多流数据在 RNC 的 RLC 层进行划分，资源调度独立进行。

在调度时可考虑优先级，因此对于服务小区的传输采用普通优先级，而对于副小区的传输采用低优先级。这样做的目的是多流传输的用户不会造成非多流传输用户数据传输速率的下降，而是使用邻小区未使用的资源。

HSDPA 多流传输与 WCDAM 软切换及 LTE CoMP 传输相似。HSDPA 采用与 WCDMA 相同的架构和传输网，而 CoMP 采用集中式的基带板和低时延的传输网。HSDPA 多流传输将数据在小区间划分，不同的数据在不同的小区传输，而 WCDMA 软切换和 LTE CoMP 是在不同的小区传输相同的数据。HSDPA 多流传输在反馈时可以利用上行软切换机制（其传输基于小区的 CQI 和重传标识反馈信息。多个基站利用软切换的方式来接收上行链路数据，每个基站忽略反馈给其他基站的信息。这些多小区操作概念的差异在表 14.1 中进行总结。

采用多流传输后，小区边缘速率由于以下两个原因得到提升：

① 当两个小区向一个用户同时传输数据时，用户可以获得更大的发射功率。

② 当 UE 采用 IC 接收机（Type 3i）时小区间干扰可以有效消除。

图 14.9 给出了每个小区两个 UE 时是否采用多流传输特性的小区内用户传输速率分布。从图中可以看出，采用多流传输，小区边缘用户传输速率（5% CDF 点）提升 33%，由 3M 提提升到 4Mbit/s。对于小区边缘的提升十分重要，这是由于从用户的角度看，小区边缘的传输速率是影响用户体验的主要限制因素。中点用户的传输速率提升 10%

表 14.1 WCDMA 软切换、HSDPA 多流传输和 LTE CoMP 对比

	WCDMA 软切换	HSDPA 多流传输	LTE CoMP 联合传输
架构	RNC + NB	与 WCDMA 相同	集中式基带板 + RF 单元
传输网	可以忍受低带宽和高时延	与 WCDMA 相同	高带宽低时延
数据传输	不同小区相同数据	不同数据相同小区	不同小区相同数据
UE 反馈	所有 NB 相同的反馈（功控信息）	不同 NB 不同反馈信息（CQI 和 HARQ 反馈）	为波速赋形集中式基带板进行快速反馈

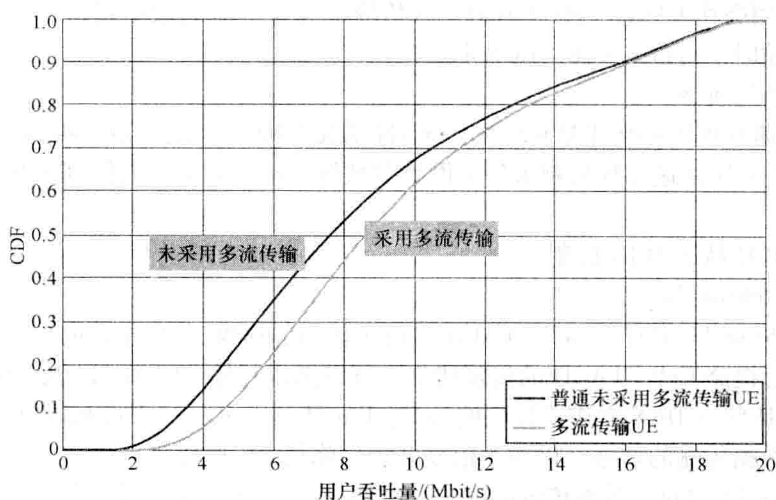


图 14.9 多流传输增益

14.5 小数据包效率提升

在对于新版本的相关讨论中，更多的关注在于提升系统峰值数据速率和用户传输速率。这些数据传输速率能力对于大数据传输非常重要，但是如何有效地提升小

数据传输的效率也是需要考虑的问题。在 HSPA Release 5 和 6 中利用快速调度和资源分配来提升数据传输效率。在 HSPA 系统中对于资源的分配仍有一定的限制，特别地 DPCCH 的连续传输造成了资源的浪费。以智能终端业务为例，其主要为 0.5 ~ 10kB 大小的数据包。这些数据包的大小已经远远超过了 RACH 传输的能力，RACH 信道最多能通过几个 RACH 信息携带几百 B 的数据。因此，需要为智能终端业务的传输分配 HSPA 信道资源。在 1Mbit/s 传输速率的 HSPA 网络中传输 1kB 数据需要 10ms，而 HSPA 信道分配需要花费 100ms 的时间。不活跃时间一般为几 s 而实际的传输时间仅为几 ms，这样对于资源的使用是极大的浪费。这也造成了链路 DPCCH 信道传输产生的干扰，特别是在上行链路方向。网络资源的开销非常大，但是实际使用时间却很短；同时，当信道占用时，UE 需要花费功率以传输 DPCCH。为数据传输建立信道的时延影响用户体验，并造成较高的信令开销。从 Release7 到 Release 11 已经提出相关方案提升数据传输效率。

（1） Release 7

① 连续数据传输 （CPC） 为 Cell_ DCH 状态带来不连续的发射和传输（DTX/DRX）。

② 采用高速 FACH （HS-FACH） 来传输小或者中型的数据包，以使用户在进行数据传输时不需进入 Cell_ DCH 状态。

（2） Release 8

① 高速 RACH （HS-RACH） 在上行链路承载小到中型数据包在 Release 7 中完成。

② UE 采用快速休眠机制来告诉网络其数据网传输完毕，来使网络将其放置到省电状态。

③ FACH 状态 DRX 机制

（3） Release 11

在 Release 11 中对于 Cell_ FACH 进行了较多的增强。其中主要的增强方面在于可以为下行链路 Cell_ FACH 的传输建立上行链路以传输 CQI 和 HARQ-ACK 反馈，Cell_ FACH 状态 DRX 操作及优化的 Cell_ FACH 到 Cell_ PCH 状态转换。这些主要都是为小数据传输的增强，以减小信令开销，降低 UE 功耗。

Release 11 中对于数据传输的演进总结在表 14.2 和图 14.10 中给出。

表 14.2 数据传输演进

	L1 控制面	L1 用户面
Release 99 WCDMA	慢速交换（电路域交换）	慢速交换（电路域交换）
Release 6 HSPA	慢速交换（电路域交换）	快速交换（分组域交换）
Release 7 CPC	采用 DTX/DRX 的慢速交换	快速交换（分组域交换）
Release 8 HS-RACH	快速交换（分组域交换）	快速交换（分组域交换）

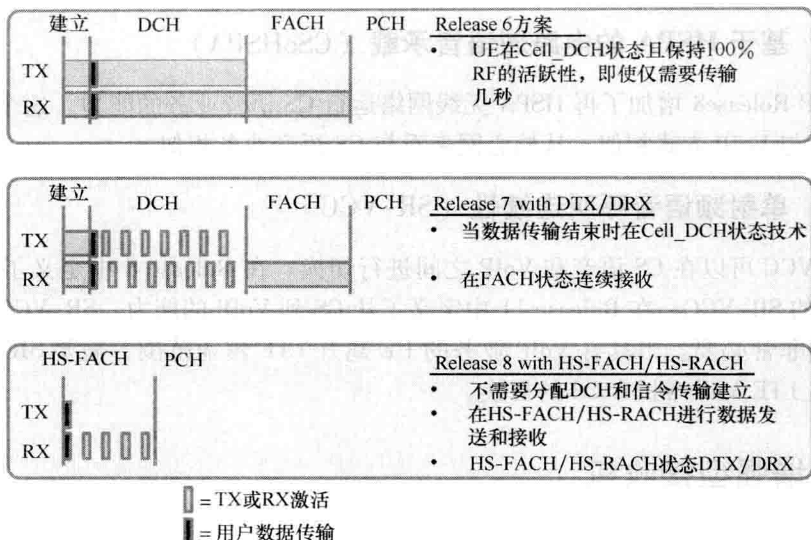


图 14.10　小数据传输方案演进

14.6　语音演进

对于智能终端应用，高质量的语音业务是其重要的一个部分。HSPA 增强对于语音业务在语音质量、容量、功率消耗和与 LTE 互操作方面进行增强。

14.6.1　自适应都速率宽带（AMR-WB）语音编码

AMR-WB 在 3GPP Release 4 中定义，其针对电路域语音业务。AMR-WB 通过将语音采样速率从 8kHz 增加到 16kHz 来提升语音质量，这使得语音带宽更大。典型的无线传输速率仍与 AMR 窄带（AMR-NB）方式相同。因此采用 AMR-WB 的语音容量与 AMR-NB 相似。AMR-WB 已经在数以十计的网络中应用，目前很多新的 UE 也支持 AMR-WB。

14.6.2　IP 语音业务（VoIP）

3GPP Release 7 实现了 HSPA 网络支持高质量大容量 VoIP 业务的能力。HSPA 无线网络利用 DTX/DRX 方式来进行语音通信，提升了 UE 的通话时长并降低了网络干扰，进而提升网络容量，特别是对于上行链路。VoIP 也使得引入新的数据业务更加容易。

14.6.3 基于 HSPA 的电路域语音承载（CSoHSPA）

3GPP Release8 增加了再 HSPA 无线网络运行 CS 语音业务的能力。这个方案从无线侧看与 VoIP 方式相似，从核心网来看与 CS 语音业务相似。

14.6.4 单射频语音呼叫连续性（SR-VCC）

SR-VCC 可以在 CS 语音和 VoIP 之间进行切换。在 Release 8 中定义了从 VoIP 到 CS 域的 SR-VCC。在 Release 11 中定义了从 CS 到 VoIP 的能力。SR-VCC 在 LTE 部署初期非常必要。当具有 VoIP 业务的 UE 离开 LTE 覆盖范围，需要 SR-VCC 来支持其从 LTE VoIP 到 3G CS 的切换。

14.7 增强型接收机

在实际中，系统的传输速率收到干扰的影响。网络的数据传输速率可以通过增强型接收机有效删除干扰来提升。增强型接收机可以在下行链路 UE 和上行链路 NB 侧应用。

14.7.1 增强型 UE 接收机

增强型 UE 接收机可以忍受小区内和小区间干扰。小区内干扰消除技术称为均衡器，且已经包含在大多数 HSDPA 接收机内。3GPP 已经针对不同类型的增强型接收机定义了性能需求。

① 类型 1 分集接收机；

② 类型 2 具有均衡器的接收机

③ 类型 3 具有接收分集和均衡器的接收机

④ 类型 3i 具有接收分集、均衡器和小区间干扰消除能力的接收机

3GPP 协议中不会定义具体的结合搜集算法，具体算法方案由 UE 制造商自己确定，其性能可以高于 3GPP 的需求。类型 3 和 3i 接收机性能的仿真结果见图 14.11[2]。在小区边缘场景上，当 G-值为 -3dB 和 0dB 时，相比较于类型 3 接收机，类型 3i 接收机可以将吞吐量提升 20% ~25%。在实际网络中可以达到更大的增益。由于增强型接收机对于网络未做修改，因此其对运营商而言较为有利。

14.7.2 NB 增强型接收机

NB 侧增强型接收机可以删除小区内干扰及其多径干扰。上行链路的小区间干扰较小因此没有必要进行删除。在 3GPP 中并没有对于 NB 增强型接收机的需求。

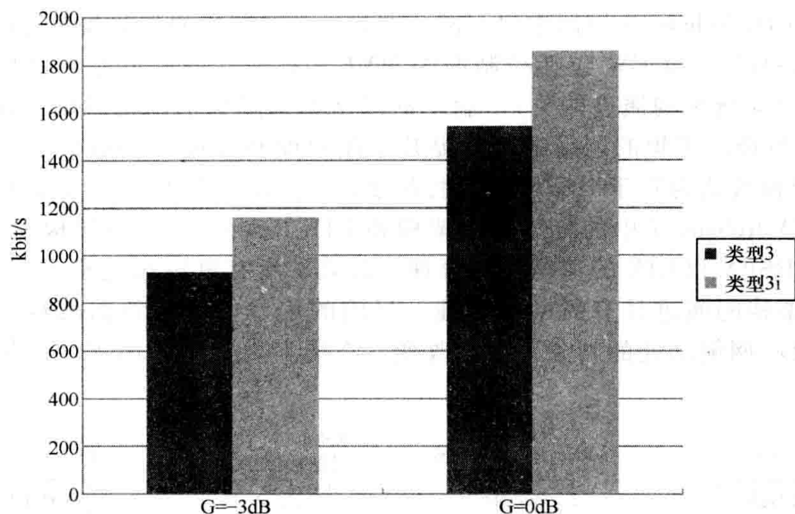


图 14.11 类型 3i 接收机吞吐量增益

其中，Turbo 编码并行干扰消除（PIC）算法得到了较多的关注。其主要思路是估计经过 Turbo 译码后的物理信道数据，然后通过编码重新生成编码后的数据，通过这样的方式来删除收到的其他用户的信号来提升接收性能。通过仿真可见，采用 Turbo PIC 可以将上行链路容量提升 60% 以上。具体的接收机架构在图 14.12 中给出。干扰消除对于高速 HSUPA 连接非常重要，否则其将会对于其他同时传输的用户造成加到的干扰。

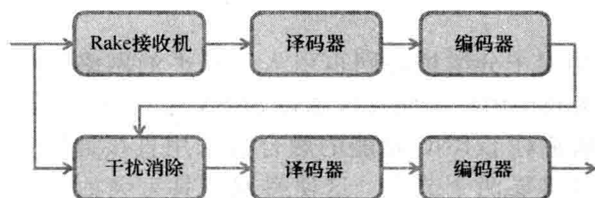


图 14.12 基于编码的并行干扰协调接收机框架

上行链路均衡与多径信道条件下的高速率 HSUPA 连接等效。多径干扰会影响接收性能，但是可以通过使用均衡接收来提升性能。

14.8 扁平架构

3GPP Release 6 中在用户和控制面具有四个网络：基站（NB），RNC（无线网络控制器），SGSN（服务 GPRS 支持节点）和 GGSN（网关 GPRS 支持节

点）。在 LTE Release 8 网路中仅有两个网元：无线网络的基站及核心网侧的接入网关（a-GW）。a-GW 包括控制面的 MME（移动性控制单元）和用户面的 SAE GW（系统架构演进网关）。扁平的网络架构降低了网络时延，提升端到端的用户性能。平坦的网络架构也提升了用户面和控制面的有效性。扁平化的网络架构被认为对于 HSPA 网络也有益处，因此在 Release 7 中进行了标准化。HSPA Release 7 中的扁平网络架构和 LTE Release 8 网络架构完全相同。NB 控制 HSPA 和 LTE 的移动性的管理、计算、所有重传和包头压缩等。HSPA 网络架构的演进具有后向兼容性，目前的用户仍然被新的架构服务，无线侧和核心网侧功能的划分为发生改变。在图 14.13 中给出了网络架构演进的示意。

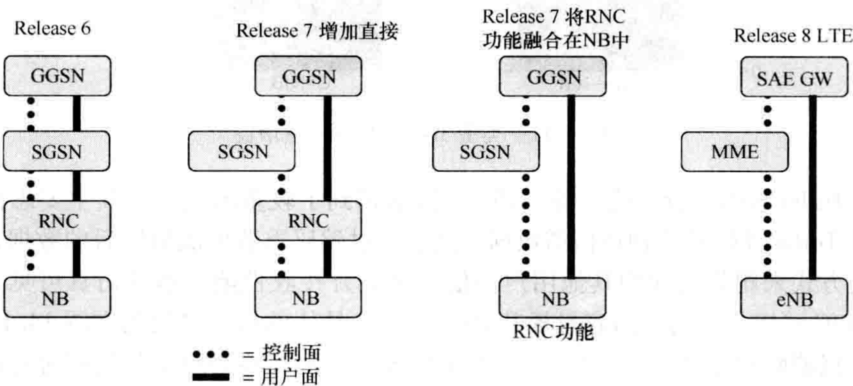


图 14.13　平坦网络架构演进

在 Release 7 中对于分组核心网也引入了扁平的网络架构，其称为直接通道方案。这种方案允许用户平面直接越过 SGSN 建立直接通道。如果采用扁平的网络架构采用基站对于 RNC 功能的融合且采用直接通道方式，网络侧对于用户数据的传输仅需要两个节点。这使得网络具有灵活的可扩展性，且减小 HSPA 网络演进对于其他网络现有节点的影响。这对于减小每比特的消耗具有重要意义。由于 LTE 中的网关与 GGSN 具有相同的功能，这使得 LTE 和 HSPA 共核心网部署成为可能。

14.9　与 LTE 互操作

在 HSPA 网络上叠加 LTE 需要在两张网络之间增加互操作的功能。互操作功能包括空闲态、语音切换和数据切换。在 LTE 网络部署的第一阶段，LTE 支持 UE 从 HSPA 到 LTE 进行重选操作。重选仅可应用于空闲态和 PCH 状态，但不能用户

FACH 状态。因此，对于 HSPA 网络的参数需要进行优化，以保证 UE 可以更快的回到 PCH 状态来平缓接入 LTE 网络。在后续阶段，互操作支持重定向和数据切换功能，以使 UE 可以从 HSPA Cell_ DCH 状态直接进入 LTE。如果 UE 越过了 LTE 的覆盖范围，其将通过切换或者重定向的方式转换到 HSPA 网络。在所有的互操作方案中，分组域切换具有最短的数据连接终端时间。第一阶段的互操作方式在图 14.14 中给出。

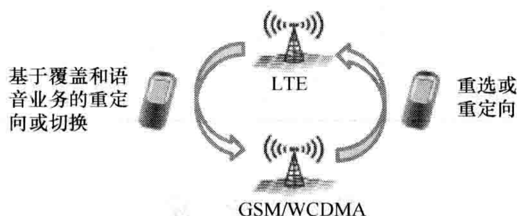


图 14.14　早期 LTE 和 HSPA 网络互操作

在最初阶段 LTE 智能终端的语音业务采用 CS 回退切换方式（CSFB）。在呼叫建立阶段 UE 从 LTE 转移到 3G 网络。网络间的转换可以采用重定向或者切换的方式。当语音业务结束，UE 通过重选或者重定向方式返回 LTE 网络。

14.10　小结

HSPA 在 Release 7、8、9、10 和 11 中的演进增加了很多的特性来提升用户数据传输速率，网络频谱效率，语音支持和智能终端的支持。演进主要从更宽的带宽、更多的天线、更多的传输小区和更多的数据业务增强方面进行。系统的峰值数据速率在 40MHz 带宽下达到下行链路 336Mbit/s。技术演进通过多载波技术提升了高速连接态的系统效率，通过使用高速共享信道来增强智能终端小数据包的传输效率。通过支持在 HSPA 网络中进行语音传输来提升语音业务效率。传输可以采用电路域方式或者 VoIP 方式。

表 14.3 对于 HSPA 演进在不同的应用场景下获得的增益进行总结。多载波和 MIMO 提升了系统峰值数据速率。所有的演进特性都提升了小区容量和网络使用效率，特别是多载波技术提升了网络负载均衡，多接收天线提升上行链路性能。这些特性也可以有效提升小区边缘用户速率，其中多流传输和 UE 增强型接收机提升下行链路边缘用户性能。智能终端业务体验的提升包括语音质量提升、业务应用低时延和低功耗。HSPA 演进已经为未来用户数量增加和用户体验提升做好了准备。

表 14.3 HSPA 演进获得的性能增益

	峰值数据速率	小区容量和网络利用率	小区边缘用户速率	智能终端体验
多载波	+ +	+ +	+ +	+
MIMO	+ +	+发送天线 + +接收天线	+发送天线 + +接收天线	+
多流	–	+	+ +	+
小数据包效率	–	+	–	+ +
语音增强	–	+	–	+
增强型接收机	–	+	+ +	+

参考文献

1. Holma, H. and Toskala, A. (2010) *WCDMA for UMTS – HSPA evolution and LTE*, 5th edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
2. 3GPP TR 25.963 (2007) Technical Report, 3rd Generation Partnership Project; Feasibility study on interference cancellation for UTRA FDD, User Equipment (UE).

附录　英文缩略语对照表

缩　写	英文全拼	中文释义
3GPP	Third Generation Partnership Project	第3代合作伙伴计划
AAA	Authentication, Authorization and Accounting	认证、鉴权和计费
ABS	Almost Blank Subframe	几乎空白子帧
ACK	Acknowledgement	肯定确认
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio	邻道泄漏比
ADC	Analogue-to-Digital Conversion	模数转换
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	非对称数字用户环路
A-GW	Access Gateway	接入网关
AM	Acknowledged Mode	确认模式
AMC	Adaptive Modulation and Coding	自适应调制和编码
AMR	Adaptive MultiRate	自适应多速率
AMR-NB	AMR NarrowBand	窄带 AMR
AMR-WB	AMR WideBand	宽带 AMR
ANDSF	Access Network Discovery and Selection Function	接入网发现和选择功能
AP	Application Protocol	应用协议
ASN. 1	Abstract Syntax Notation One	抽象语法标记
CA	Carrier Aggregation	载波聚合
CAPEX	Capital Expenditures	资本支出
CB	Coordinated Beamforming	协同波束赋形
CC	Component Carrier	分量载波
CCO	Coverage and Capacity Optimization	覆盖和容量优化
CCS	Component Carrier Selection	分量载波选择
CDD	Cyclic Delay Diversity	循环延时分集
CDM	Code Division Multiplex	码分复用
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CGI	Cell Global Identity	小区全球标识
CIF	Carrier Indicator Field	载波指示域
CM	Cubic Metric	立方度量

（续）

缩　写	英文全拼	中文释义
CO_2	Carbon Dioxide	二氧化碳
COC	Cell Outage Compensation	小区中断补偿
CoMP	Coordinated MultiPoint	协同多点
CPC	Continuous Packet Connectivity	连续性分组连接
CQI	Channel Quality Indicator	信道质量指示符
CRS	Common Reference Signals	公共参考信号
CS	Coordinated Scheduling	协调调度
CS	Circuit Switched	电路交换
CSG	Closed Subscriber Group	封闭用户群
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CSoHSPA	Circuit Switched Voice over HSPA	HSPA 电路交换语音
DAC	Digital-to-Analogue Conversion	数模转换
DAS	Distributed Antenna System	分布式天线系统
DCC	Downlink Component Carrier	下行链路分量载波
DCH	Dedicated Channel	专用信道
DCCH	Dedicated Control Channel	专用控制信道
DC-HSDPA	Dual Cell HSDPA	双小区 HSDPA
DCI	Downlink Control Information	下行链路控制信息
DCS	Dynamic Cell Selection	动态小区选择
DIP	Dominant Interferer Proportion	主导干扰比例
DM-RS	Demodulation Reference Signal	解调参考信号
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel	专用物理控制信道
DRX	Discontinuous Reception	不连续接收
DTX	Discontinuous Transmission	不连续发射
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot	下行链路导频时隙
eICIC	Enhanced Inter-Cell Interference Coordination	增强型小区间干扰协调
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power	等效全向辐射功率
eNB	eNodeB	LTE 增强型基站
EPC	Evolved Packet Core	演进分组核心网
ePDCCH	enhanced Physical Downlink Control Channel	增强型物理下行链路控制信道
ES	Energy Saving	节能
FACH	Forward Access Channel	前向接入信道

（续）

缩　写	英文全拼	中文释义
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FGI	Feature Group Indicators	功能组指示符
GGSN	Gateway GPRS Support Node	网关 GPRS 支撑节点
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统
GP	Guard Period	保护时隙
GPRS	General Packet Radio Service	通用分组无线业务
GSM	Global System for Mobile Communication	全球移动通信系统
GTP	GPRS Tunnelling Protocol	GPRS 隧道协议
GW	Gateway	网关
HARQ	Hybrid Automatic Repeat-reQuest	混合自动重传请求
HetNet	Heterogeneous Networks	异构网络
HLR	Home Location Register	归宿位置寄存器
HO	Handover	切换
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access	高速下行链路分组接入
HS-FACH	High Speed FACH	高速 FACH
HSPA	High Speed Packet Access	高速分组接入
HSS	Home Subscriber Server	归属用户服务器
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access	高速上行链路分组接入
IC	Interference Cancellation	干扰消除
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination	小区间干扰协调
ID	Identity	标识符
IMS	IP Multimedia Sub-system	IP 多媒体子系统
IMT	International Mobile Telecommunications	国际移动通信
IP	Internet Protocol	因特网协议
IPSec	IP Security	IP 安全
IQ	Imaginary Quadratic	同相和正交分量
IRC	Interference Rejection Combining	干扰抑制合并
ISD	Inter-Site Distance	站点间距离
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
JT	Joint Transmission	联合发送
KPI	Key Performance Indicator	关键性能指标
LGW	Local Gateway	本地网关

（续）

缩　写	英文全拼	中文释义
LIPA	Local IP Access	本地 IP 接入
LLR	Log-likelihood Ratio	对数似然率
LTE	Long Term Evolution	长期演进
MAC	Medium Access Control	媒体接入控制
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service	多媒体广播和多播业务
MBSFN	Multicast Broadcast Single Frequency Network	多播/组播单频网络
MCL	Minimum Coupling Loss	最小耦合损耗
MDT	Minimization of Drive Testing	最小化路测
MIB	Master Information Block	主信息块
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
MLB	Mobility Load Balancing	移动性负载均衡
MME	Mobility Management Entity	移动性管理实体
MRC	Maximal Ratio Combining	最大比合并
MRO	Mobility Robustness	移动鲁棒性
MMSE	Minimum Mean Square Error	最小均方误差
MPR	Maximum Power Reduction	最大功率降低
MTC	Machine Type Communication	机器类通信
MU-MIMO	Multi-User MIMO	多用户 MIMO
OAM	Operation Administration Maintenance	操作、管理和维护
OCC	Orthogonal Cover Codes	正交掩码
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
O&M	Operation and Maintenance	运行与维护
OPEX	Operating Expenditures	运营成本
OTDOA	Observed Time Difference Of Arrival	可观察的到达时间差
PA	Power Amplifier	功率放大器
PBCH	Physical Broadcast Channel	物理广播信道
PCC	Primary Component Carrier	主分量载波
PCC	Policy and Charging Control	政策与计费控制
PCell	Primary Cell	主小区
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel	物理控制格式指示信道
PCH	Paging Channel	寻呼信道
PCI	Physical Cell Identity	物理小区标识

（续）

缩　写	英 文 全 拼	中 文 释 义
PCRF	Policy and Charging Rules Function	策略及计费控制功能
PDCCH	Physical Downlink Control Channel	物理下行控制信道
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PDN	Packet Data Network	分组数据网络
PDP	Packet Data Protocol	分组数据协议
PDU	Payload Data Unit	有效负荷数据单元
P-GW	PDN Gateway	PDN 网关
PHICH	Physical HARQ Indicator Channel	物理 HARQ 指示信道
PHR	Power Headroom Reporting	功率余量报告
PIC	Parallel Interference Cancellation	并行干扰消除
PMI	Precoding Matrix Indicator	预编码矩阵指示符
PRB	Physical Resource Block	物理资源块
PRG	Precoding Resource block Group	预编码资源块组
PSS	Primary Syncronization Signal	主同步信号
PUCCH	Physical Uplink Control Channel	物理上行链路控制信道
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel	物理上行链路共享信道
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交调幅
QCI	QoS Class Identifier	QoS 分类标识
QoS	Quality of Service	服务质量
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	四相相移键控
RACH	Random Access Channel	随机接入信道
RAN	Radio Access Network	无线接入网络
RAT	Radio Access Technology	无线接入技术
RE	Range Extension	范围扩展
RER	Re-Establishment Request	重建立请求
RET	Remote Electrical Tilt	远程电调
RF	Radio Frequency	射频
RI	Rank Indicator	秩指示
RIM	RAN Information Management	RAN 信息管理
RLC	Radio Link Control	无线链路控制
RLF	Radio Link Failure	无线链路失败
RN	Relay Node	中继节点

（续）

缩　写	英文全拼	中文释义
RNC	Radio Network Controller	无线网络控制器
RNTI	Radio Network Temporary Identifier	无线网络临时标识
R-PDCCH	Relay PDCCH	中继节点 PDCCH
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制
RSRP	Reference Signal Received Power	参考信号接收功率
RSRQ	Reference Signal Received Quality	参考信号接收质量
RTP	Real Time Protocol	实时控制协议
RRH	Remote Radio Head	远程无线电头端
RRM	Radio Resource Management	无线资源管理
SA	System Aspects	系统方面
SAE	System Architecture Evolution	系统架构演进
SAP	Single Antenna Port	单天线端口
SCell	Secondary Cell	辅小区
SFN	Single Frequency Network	单频网络
SGSN	Serving GPRS Support Node	服务 GPRS 支撑节点
S-GW	Serving Gateway	服务网关
SIB	System Information Block	系统信息块
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio	信干噪比
SON	Self-Organizing Networks	自组织网络
SORTD	Space-Orthogonal Resource Transmit Diversity	空间正交资源发送分集
SPS	Semi-Persistent Scheduling	半持续调度
SRS	Sounding Reference Signal	探测参考信号
SR-VCC	Single Radio Voice Call Continuity	单射频语音呼叫连续性
SSS	Secondary Synchronization Signal	辅同步信号
TCO	Total Cost of Ownership	总拥有成本
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TM	Transmission Mode	传输模式
TTG	Tunnel Termination Gateway	隧道终止网关
TTI	Transmission Time Interval	传输时间间隔
UCI	Uplink Control Information	上行链路控制信息
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议
UE	User Equipment	用户设备

（续）

缩　写	英文全拼	中文释义
ULA	Uniform Linear Arrays	均匀线性阵列
UM	Unacknowledged Mode	非确认模式
URS	UE specific Reference Signal	UE 专用参考信号
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot	上行链路导频时隙
USB	Universal Serial Bus	通用串行总线
VoIP	Voice over IP	IP 语音
VoLTE	Voice over LTE	LTE 语音
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	宽带码分多址
WiFi	Wireless Fidelity	无线保真
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	全球微波互联接入
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网

国际视野 科技前沿

国际信息工程先进技术译丛

《LTE-Advanced：面向IMT-Advanced的3GPP解决方案》
《智能摄像机》
《基于片上去耦电容的配电网络》（原书第2版）
《短距离无线系统的可靠通信》
《车载系统和安全的数字信号处理》
《嵌入式系统设计 —— 嵌入式信息物理系统基础》（原书第2版）
《纳米封装 —— 纳米技术与电子封装》
《内容分发网络》
《全面的功能验证：完整的工业流程》
《无线Mesh网络架构与协议》
《UMTS蜂窝系统的QoS与QoE管理》
《半导体制造与过程控制基础》
《WCDWA原理与开发设计》
《下一代移动系统：3G/B3G》
《IMS:IP多媒体概念和服务》（原书第2版）
《下一代无线系统与网络》
《深入浅出UMTS无线网络建模、
《规划与自动优化：理论与实践》
《HSDPA/HSUPA技术与系统设计——第三代移动
《通信系统宽带无线接入》
《无线传感器及元器件：网络、设计与应用》
《印制电路板——设计、制造、装配与测试》
《IPTV与网络视频：拓展广播电视的应用范围》
《多电压CMOS电路设计》
《微电子技术原理、设计与应用》
《蜂窝网络高级规划与优化2G/2.5G/3G/…向4G的演进》
《基于蜂窝系统的IMS——融合电信领域的VoIP演进》
《无线网络中的合作原理与应用》
《电生理学方法与仪器入门》
《移动电视：DVB-H、DMB、3G系统和富媒体应用》
《环境网络：支持下一代无线业务的多域协同网络》
《基于射频工程的UMTS空中接口设计与网络运行》
《未来UMTS的体系结构与业务平台：全IP的3G CDMA网络》
《数字图像处理》（原书第4版）



WILEY

上架指导 工业技术／电子技术／信息通信



ISBN 978-7-111-45058-0

定价：68.00元